



DIPLOMARBEIT

Herr B. Eng.
Matthias Wagner

**Grundlagenuntersuchung
zum Hochgeschwindigkeits-
lasertiefschweißen mit
überlagerter Bahnbewegung**

Mittweida, 2014

Fakultät Maschinenbau

DIPLOMARBEIT

Grundlagenuntersuchung zum Hochgeschwindigkeits- lasertiefschweißen mit überlagerter Bahnbewegung

Autor:

Herr B. Eng Matthias Wagner

Studiengang:

Maschinenbau

Seminargruppe:

MB12w1-A

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Udo Löschner

Einreichung:

Mittweida, 2014

Verteidigung/Bewertung:

Mittweida, 2014

Bibliografische Beschreibung:

Wagner, Matthias:

Grundlagenuntersuchung zum Hochgeschwindigkeitslasertiefschweißen mit überlagerter Bahnbewegung. - 2014. - 78 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau,
Diplomarbeit, 2014

Referat:

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit den grundlegenden Untersuchungen zum Schweißen mit überlagerten Bahnbewegungen. Hierzu werden primär Versuche durchgeführt die Aufschluss über die maximal erreichbaren Geschwindigkeiten liefern sollen. Darauf Aufbauend werden mit diesem Schweißprozess mit Blick auf die Anwendbarkeit Schweißungen durchgeführt. Zur Verifizierung der Ergebnisse werden die so erzeugten Schweißnähte bewertet und deren Belastbarkeit durch Festigkeitsuntersuchungen überprüft.

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Beschreibung:	III
Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Kapitelübersicht	2
2 Stand der Technik / Literaturrecherche	4
3 Versuchsvorbereitung	8
3.1 Versuchsaufbau	8
3.1.1 Strahlquelle	8
3.1.2 Optische Komponenten zur Strahlformung und -führung	9
3.1.3 Cross-Jet, Cross-Düse, Spannvorrichtung.....	10
3.2 Ermittlung der Strahlcharakteristika.....	14
3.2.1 Strahlvermessung	14
3.2.2 Leistungsmessung	15
3.3 Charakterisierung der Schweißproben.....	17
3.3.1 Probenmaterial.....	17
3.3.2 Probengeometrie und Probenhandling	21
4 Experimentelle Untersuchung	24
4.1 Untersuchungen zu oszillierender Strahlführung.....	24
4.1.1 Erläuterung der Konturform	24
4.1.2 Überprüfung der Konturtreue.....	27
4.1.3 Strategie zur Korrektur der Konturabweichung	29
4.1.4 Ermittlung erreichbarer Geschwindigkeiten und Frequenzen.....	33
4.1.4.1 Bahngeschwindigkeit.....	33
4.1.4.2 Lineare Vorschubgeschwindigkeit	37
4.1.4.3 Ermittlung der Wobbelfrequenz	38

4.2	Untersuchungen zu pendelnder Strahlführung.....	41
4.2.1	Erläuterung der Konturform	41
4.2.2	Überprüfung der Konturtreue.....	42
4.2.3	Unterbinden der Konturabweichung	43
4.2.4	Ermittlung erreichbarer Geschwindigkeiten und Frequenzen.....	44
4.2.4.1	Bahngeschwindigkeit.....	44
4.2.4.2	Lineare Vorschubgeschwindigkeit	48
4.2.4.3	Ermittlung der Pendelfrequenz	50
4.3	Schweißen mit pendelnder Strahlführung.....	51
4.3.1	Festlegen einer Einteilung zwischen bedingte und volle Durchschweißung	51
4.3.2	Ermittlung der Durchschweißgeschwindigkeit und Festlegung der Schweißparameter	53
5	Charakterisierung der Schweißnähte.....	59
5.1	Bewertung der Schweißnähte	59
5.1.1	Durchführen einer Sichtprüfung.....	59
5.1.2	Bewertung auf Unregelmäßigkeiten.....	61
5.2	Festigkeitsuntersuchungen.....	66
5.2.1	Härtemessung	66
5.2.2	Zugprüfung.....	71
6	Zusammenfassung / Fazit.....	75
Quellenangabe		III
Anlagenverzeichnis.....		VII
Anlage A		VIII
Anlage B		IX
Anlage C		X
Anlage D		XI
Anlage E		XII
Anlage F		XIII
Anlage G		XIV
Selbstständigkeitserklärung		XVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Experimenteller Versuchsaufbau	8
Abbildung 2: Strahlquelle – IPG Photonics YLR-3000-SM.....	9
Abbildung 3: Cross-Jet.....	10
Abbildung 4: Cross-Düse	11
Abbildung 5: Positionierung der Cross-Düse [1]	12
Abbildung 6: Spannvorrichtung	13
Abbildung 7: Leistungsmessung am verwendeten 3 KW Monomode Faserlaser.....	16
Abbildung 8: Gefüge des Grundwerkstoffes X5CrNi18-10.....	17
Abbildung 9: Gefüge des Grundwerkstoffes 22MnB5 mit Zinkbeschichtung	20
Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wobbelkontur	25
Abbildung 11: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit.....	27
Abbildung 12: Abweichung vom Radienverhältnis in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Wobbelradius	28
Abbildung 13: Darstellung des Driftverhaltens zwischen den Wobbelradien bei Erhöhung der Bahngeschwindigkeit	28
Abbildung 14: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter.....	32
Abbildung 15: Abweichung vom Radienverhältnis in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Wobbelradius nach Korrektur der Eingabeparameter	33
Abbildung 16: Darstellung der resultierenden Bahngeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit	35
Abbildung 17: Darstellung der resultierenden Bahngeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter	36
Abbildung 18: Darstellung der resultierenden Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter	38
Abbildung 19: Resultierende Wobelfrequenz bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten und Wobbelradien	39
Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Wobelfrequenz in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit.....	40
Abbildung 21: Schematische Darstellung der Pendelkontur	41

Abbildung 22: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von Pendelbreite und Schrittweite	42
Abbildung 23: Erreichbare Bahngeschwindigkeit bei unterschiedlichen Pendelbreiten	46
Abbildung 24: Erreichbare Vorschubgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Pendelbreiten	49
Abbildung 25: Beispiel einer bedingt durchgeschweißten Pendelkontur; Blindnaht	51
Abbildung 26: Beispiel einer voll durchgeschweißten Pendelkontur; Blindnaht.....	52
Abbildung 27: Beispiel einer bedingt durchgeschweißten Pendelkontur; Stumpfnahht ..	52
Abbildung 28: Beispiel einer voll durchgeschweißten Pendelkontur; Stumpfnahht	53
Abbildung 29: Vergleich der maximalen Vorschubgeschwindigkeiten mit und ohne Einsatz der Cross-Düse, bei der eine volle Durchschweißung erreicht wurde	54
Abbildung 30: Gegenüberstellung des Pendelschweißens am 22MnB5 mit und ohne den Einsatz der Cross-Düse	56
Abbildung 31: Vergleich maximaler Durchschweißgeschwindigkeiten bei geradliniger und gependelter Strahlführung	58
Abbildung 32: Darstellung der Nahtoberraupen am X5CrNi18-10 bei verschiedenen Materialstärken.....	59
Abbildung 33: Querschliffaufnahmen der Schweißnähte am X5CrNi18-10.....	60
Abbildung 34: Querschliffaufnahme und Darstellung der Nahtoberraupe einer Schweißnaht am 22MnB5.....	60
Abbildung 35: Anordnung der Härteeindrücke am Beispiel einer Mikrohärteprüfung am Werkstoff 22MnB5	66
Abbildung 36: Härteverlauf am Werkstoff X5CrNi18-10; Materialstärke: $s = 1,0$ mm und $s = 2,0$ mm	67
Abbildung 37: Härteverläufe am Werkstoff X5CrNi18-10; Materialstärke: $s = 1,0$ mm ..	68
Abbildung 38: Härteverlauf am Werkstoff 22MnB5; Materialstärke $s = 1,6$ mm	69
Abbildung 39: Vergleich der Härteverläufe von pendelnder und geradliniger Strahlführung; Materialstärke $s = 1,6$ mm	69
Abbildung 40: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 1,0$ mm	72
Abbildung 41: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 1,5$ mm	72
Abbildung 42: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 2,0$ mm	73
Abbildung 43: Spannungs-Dehnungsdiagramm für 22MnB5; Materialstärke $s = 1,6$ mm	74

Abbildung 44: Gegenüberstellung einer Zugprobe mit Stumpstoßnaht und der Grundwerkstoff-Zugprobe.....	74
----------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Schweißparameter aus [5]	6
Tabelle 2:	Durch Strahlvermessung ermittelte räumliche Strahlparameter	14
Tabelle 3:	Werkstoffkennwerte des Werkstoffes X5CrNi18-10	18
Tabelle 4:	Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes X5CrNi18-10	19
Tabelle 5:	Werkstoffkennwerte des Werkstoffes 22MnB5	20
Tabelle 6:	Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes 22MnB5	21
Tabelle 7:	Auflistung der verschiedenen Probengeometrien	22
Tabelle 8:	Auflistung der resultierenden Radien bei unkorrigierter Konturerstellung	30
Tabelle 9:	Ermittelte Polygon-Delay-Werte zur Vermeidung der Konturabweichung	43
Tabelle 10:	Zusammenstellung der erreichten Bahngeschwindigkeiten bei pendelnder Strahlführung	47
Tabelle 11:	Zusammenstellung der Prozessparameter für die Versuchsschweißungen am Werkstoff X5CrNi18-10	54
Tabelle 12:	Zusammenstellung der Prozessparameter für die Versuchsschweißungen am Werkstoff 22MnB5	57
Tabelle 13:	Vergleich der Schweißparameter bei geradliniger und pendelnder Strahlführung	58
Tabelle 14:	Formelzeichenverzeichnis der DIN EN ISO 13919-1	61
Tabelle 15:	Bewertung der Schweißnähte auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1	62
Tabelle 16:	Gegenüberstellung der Schweißparameter bei Vergleich der Härteverläufe von geradliniger und gependelter Schweißung	70

Abkürzungsverzeichnis

B	Bor
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europäische Norm
ISO	International Organisation for Standardisation
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
Nb	Niob
Ni	Nickel
S	Schwefel
Si	Silizium
Ti	Titan
WEZ	Wärmeeinflusszone
Zn	Zink

Formelverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Maßeinheit
A	Querschnittsfläche	mm ²
A _{d0,86}	Strahlfleckquerschnitt	µm ²
a	Konturversatz	mm
b	Nahtbreite	mm
d _{0,86}	Fokusbilddurchmesser	µm
F	Kraft	N
F _Z	Zugkraft	N/mm ²
f	Brennweite	mm
HRC	Härtewert nach ROCKWELL	N/mm ²
HV0,1	Härtewert nach VICKERS, Prüfkraft 0,1 N	N/mm ²
HV0,2	Härtewert nach VICKERS, Prüfkraft 0,2 N	N/mm ²
l _B	Bahnlänge	mm
l _N	Nahtlänge	mm
M _P	Menge an Pendelbewegungen	mm ⁻¹
M _W	Wobbelmenge	mm ⁻¹
P	Laserstrahlleistung	W
r1	großer Wobbelradius	mm
r1 _{IST}	Gemessener Ist-Wert des Radius r1	mm
r2	Kleiner Wobbelradius	mm
r2 _{IST}	Gemessener Ist-Wert des Radius r2	mm
r2 _{NEU}	Korrigierter Eingabewert für den Radius r2	mm
S	Schrittweite	µm
s	Materialstärke	mm
t	Bearbeitungszeit	s
u	Amplitude	mm
V	Radienverhältnis	-
V _{IST}	Gemessener Ist-Wert des Radienverhältnisses	-
V _{Neu}	Korrigierter Eingabewert für das Radienverhältnis	-
v _B	Bahngeschwindigkeit	m/s
v _f	Vorschubgeschwindigkeit	m/s
Y	Pendelbreite	mm
σ	Spannung	N/mm ²

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahrzehnten findet das Laserschweißen zunehmend Anwendung in der industriellen Fertigung. Das liegt überwiegend an verfahrenseigenen Vorteilen wie bspw. der gezielten und örtlich begrenzten Energieeinbringung, was einen geringeren thermischen Verzug gegenüber anderer Schweißverfahren zur Folge hat. Oder die gute Automatisierbarkeit dieses Verfahrens sowie die Erreichbarkeit schwer zugänglicher Schweißpositionen durch das sogenannte Laser-Remote-Schweißen. Überdies ermöglichen moderne Laseranlagen hohe Strahlleistungen und Prozessgeschwindigkeiten, die dieses Verfahren auch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten immer attraktiver machen. Ebenso verändert sich durch verbessertes Equipment zur Strahlführung und -formung die Strahlqualität. Wo vor wenigen Jahren Fokusbereich Durchmesser von mehreren hundert Mikrometern als Standard anzusehen waren, sind heutzutage Fokusbereich Durchmesser unter 100 μm keine Seltenheit mehr.

Diese hochbrillanten Strahlqualitäten haben sowohl eine verbesserte Tiefschweißfähigkeit des Laserschweißens zur Folge wie auch wesentlich höher Genauigkeiten, mit der positioniert und bearbeitet werden kann. Obwohl die hohen Strahlqualitäten und somit die damit einhergehenden Vorteile zunächst als durchaus positiv anzusehen sind, ergeben sich jedoch für viele Anwendungen ganz neue Problemstellungen. Denn mit zunehmender Strahlqualität wird der Laserschweißprozess immer anfälliger auf fertigungstechnische Gegebenheiten wie Fügspalt und Kantenversatz.

Die hohe Genauigkeit, die das Schweißen von sehr filigranen, komplexen oder tief ins Material reichenden Schweißnähten ermöglicht, verlangt aber eine ebenso präzise Nahtvorbereitung. Der Aufwand, der folglich zum Schweißen mit Laser erforderlich ist, macht es für viele technische Bereiche wiederum unpraktisch bzw. unwirtschaftlich.

Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit das Schweißen nach geometrisch bestimmten Konturformen untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist

die Entwicklung eines prozesssicheren Fügeverfahrens und die Ermittlung erreichbarer Prozessgeschwindigkeiten. Weiterhin wird eine Überprüfung auf das Schweißphänomen Humping sowie die Fähigkeit zur Spaltüberbrückung vorgenommen. Um die Vor- bzw. Nachteile des Schweißens mit überlagerten Bahnbewegungen gegenüber dem geradlinigen Schweißen aufzuzeigen, wird ein Vergleich mit den Ergebnissen der Arbeit von Schwind [1] vorgenommen.

1.2 Aufgabenstellung

Die Zielstellung der Arbeit ist das Erreichen einer höchstmöglichen Schweißgeschwindigkeit beim Durchschweißen von hochfesten Stählen.

Dazu sollen Möglichkeiten der Beeinflussung des Plasmas bzw. der Dampf-Plasmafackel beim Schweißprozess gesucht und überprüft werden. Hierfür sind Versuche mit überlagerter Bewegung des Laserspots (wobbeln, pendeln) und der Einsatz der Cross-Düse vorgesehen.

In der Versuchsauswertung sind u.a. Schliffe und Zugversuche durchzuführen.

1.3 Kapitelübersicht

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich in folgende Kapitel.

Im **Kapitel 1** wird die Thematik dieser Arbeit präzisiert und Motivation sowie die Zielstellung der durchgeführten Untersuchungen erläutert.

Anhand der Literaturrecherche in **Kapitel 2** soll der Leser einen Einblick in die umfassenden Untersuchungen zum Schweißen mit überlagerten Bewegungen bekommen, und der aktuelle Stand der Technik aufgezeigt werden.

Anschließend wird im **Kapitel 3** auf die versuchsvorbereitenden Maßnahmen und verwendeten Ausrüstungen eingegangen um eine Reproduzierbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten.

Kapitel 4 beschäftigt sich mit den experimentellen Untersuchungen zur Erzeugung der geometrischen Konturformen. Anschließend werden die Geschwindig-

keiten ermittelt, die mit der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik erreichbar waren. Darauf aufbauend werden die Parameter erarbeitet, die zur Erzeugung demonstrativer Schweißnähte verwendet wurden.

In **Kapitel 5** werden die Schweißnähte, die durch pendelnde Strahlführung erzeugt wurden, zunächst anhand einer Sichtprüfung und der Überprüfung auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten bewertet. Anschließend wird die Schweißnahtausprägung anhand von Härtemessungen dargelegt und deren Belastbarkeit durch Zugversuche ermittelt.

Abschließend werden im **Kapitel 6** die Resultate aus den Untersuchungen zusammengefasst und sowie ein Ausblick auf mögliche weitere Untersuchungen und Prozessverbesserungen gegeben.

.

2 Stand der Technik / Literaturrecherche

Anhand der Literaturrecherche zum Thema Schweißen mit überlagerten Bahnbewegungen zeigt sich, dass es eine Vielzahl möglicher Anwendungsgebiete für dieses Schweißverfahren gibt.

Zahlreiche Untersuchungen zu dieser Thematik belegen ein großes Interesse an diesem Schweißprozess. Ebenso breit gefächert wie die anlagen- und parameterseitigen Voraussetzungen bei diesen Untersuchungen sind die Zielstellungen.

Ein Großteil der aktuellen Veröffentlichungen, wie [2] beschäftigen sich beispielsweise mit der Strahloszillation zur direkten Einflussnahme auf die Schweißnahtgeometrie. Über Schweißversuche an dem Baustahl S355 wurden hierbei die Erkenntnisse gewonnen, dass durch Variation von Strahlauslenkung bzw. -amplitude, der Oszillationsfrequenz und der Vorschubgeschwindigkeit die Einschweißtiefe wie auch die Nahtbreite auf explizite Anwendungen eingestellt werden kann. Bei diesen Versuchen wurden mit Laserstrahlleistungen von 3 bis 3,7 kW, einem Fokusdurchmesser von 600 μm und Vorschubgeschwindigkeiten von 0,05 bis 0,1 m/s, Einschweißtiefen bis 5 mm erreicht. Überdies wurde in [2] von der Möglichkeit berichtet, über eine passende Parameterwahl die Qualität der Nahtoberraupe positiv beeinflussen zu können. Unter anderem wurde ein signifikantes Glätten der Oberfläche und ein deutlich verbessertes Erscheinungsbild der Schweißnaht erreicht.

Eine häufig untersuchte Eigenschaft bei oszillierender oder pendelnder Strahlführung ist die Spaltüberbrückbarkeit. Bereits in der DIN EN 1011-6 [3] wurde hierzu Stellung genommen durch: *„Das Oszillieren des Strahles eignet sich zum Verbreitern der Naht und zum Überbrücken von Fugenspalten.“*

Dies wurde beispielsweise in [4] durch Stumpfstoßschweißungen mit oszillierender oder auch wobbelförmiger Strahlbewegung untersucht. Diese Untersuchungen wurden mit Vorschubgeschwindigkeiten von 0,03 bis 0,07 m/s und Spaltbreiten bis 0,25 mm durchgeführt. Weiterhin wurden in dieser Publikation die Nahtüberhöhungen und -unterwölbungen der so erzeugten Schweißnähte nach den Bewertungsgruppen der DIN EN ISO 13919-1 beurteilt. Resultat dieser Untersuchungen ist, dass das Schweißen mit oszillierenden Strahlbewegungen die Spaltüberbrückung zwar verbessert, aber die Nahtqualität mit steigender Spaltbreite abnimmt. Da die Versuche ohne Zusatzwerkstoff durchgeführt wurden, wird die nachlassende Nahtqualität auf einen Mangel an Schmelzbad zurückgeführt.

Die Anwendbarkeit dieses Schweißverfahrens an Überlapp- und Kehlnahtverbindungen wurde in [5] und [2] untersucht. In [2] wird die erfolgreiche Substituierung eines in der Praxis üblichen Strahlversatzes durch die Bearbeitung mit oszillierender Strahlbewegung beschrieben. Das Ergebnis dieser Untersuchungen zeigte deutlich, dass anhand der vermehrten Einstellungsmöglichkeiten und Parameter eine effektivere Schweißnahtmodellierung auch an Kehlnahtverbindungen ermöglicht wird.

Die Publikation [5] hingegen beschäftigt sich mit dem Kehlnahtschweißen von verzinkten Blechen aus dem Vergütungsstahl 22MnB5. Der Schwerpunkt bestand hierbei darin, dass beim Verschweißen der verzinkten Bleche ein Spaltmaß eingehalten werden muss, um ein Ausgasen der Zinkschicht während des Schweißprozesses zu gewährleisten. Schweißversuche am Überlappstoß mit einem 5 kW-Scheibenlaser bestätigten, dass ein zum Ausgasen vorgesehener Spalt von bis zu 0,2 mm ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoff überbrückt werden konnte. Weiterhin zeigten diese Schweißversuche, dass durch eine passende Parameterauswahl eine Verringerung der Spritzerbildung und somit eine Minimierung der laufenden Kosten für beispielsweise Schutzgläser erfolgte.

Die Aussage zur verringerten Spritzerbildung wird ebenfalls von [6] bestätigt. Hierbei wurde die Spritzerbildung je gefahrene Schweißnahtlänge in Abhängigkeit der eingestellten Parameter ausgewertet. Variiert wurden hierbei die Parameter Amplitude bzw. Strahlauslenkung, Wobbelfrequenz, Vorschubgeschwindigkeit und Laserstrahlleistung. Die Bereiche stellten sich wie folgt dar:

Tabelle 1: Zusammenfassung der Schweißparameter aus [5]

Parameter	Symbol	min	max
Amplitude	u	0,2 mm	0,75 mm
Wobbelfrequenz	u_p	200 Hz	1743 Hz
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	0,017 m/s	0,15 m/s
Laserstrahlleistung	P	1000 W	3000 W

Neben den Vorteilen, die das Schweißen durch überlagerte Bahnbewegungen hinsichtlich verschiedener Stoßarten bietet, zeigen sich ebenfalls Anwendungsmöglichkeiten beim Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe. In [7] wurde dies anhand verschiedener Materialkombinationen wie:

- Aluminium / Kupfer
- Edelstahl / Kupfer
- Aluminium / Magnesium

untersucht.

Hauptaugenmerk lag hierbei in der Kombination von Aluminium und Kupfer. Die Schweißversuche wurden mit einer applizierten Laserstrahlleistung von 2 kW, einem Fokusbereich von 40 μ m und einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,07 m/s durchgeführt. Durch den Einsatz eines Galvanometerscanners konnte eine hochfrequente Strahloszillation von bis zu 2,5 kHz erreicht werden. Sowohl die Auswertung nach Schliffbildern wie auch die Ergebnisse von Zugversuchen bestätigten den erfolgreichen Verbund von Aluminium und Kupfer. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine exakte Einstellung der Scanparameter für die Laserstrahlbewegung im Vorfeld notwendig ist.

Auffallend beim Vergleich der bisher dargelegten Veröffentlichungen sind die sich ähnelnden Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 0,033 bis 0,1 m/s. Dies beruht hauptsächlich auf den bereits angesprochenen Unterschieden bzw. Erfordernissen seitens Anlagentechnik und Anwendungsgebiet. Somit befindet sich das Verfahren „Schweißen mit überlagerter Bahnbewegung“ im Geschwindigkeitsbereich der gegenwärtig häufig eingesetzten Remote-Schweißtechnik mit bis zu 0,13 m/s [5].

Gegenüber diesen praxisorientierten Untersuchungen stellt sich die Publikation [8] mit Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 0,33 m/s als sowohl auffällig wie auch richtungsweisend mit Blick auf die Hochgeschwindigkeits-Laserbearbeitung dar. Die Untersuchungen wurden mit einem 3 kW-Monomode Faserlaser der Firma IPG-Photonics durchgeführt. Mittels Variation der Vorschubgeschwindigkeit wurden, bei einem Fokusdurchmesser von 50 μm , Einschweißtiefen von bis zu 5 mm erreicht. Weiterhin wurde eine anlagenseitige Beschränkung nachgewiesen. So führte die Erhöhung der Wobbelfrequenz zu einer Abnahme der eingestellten Amplitude bzw. Strahlauslenkung. Aus diesem Grund wurden die schweißtechnischen Untersuchungen zur Ermittlung der Einschweißtiefe mit einer begrenzten Wobbelfrequenz von maximal 200 Hz durchgeführt. Zusätzlich zur oszillierenden Strahlbewegung wurde in [8] eine weitere Konturform untersucht. Die Untersuchungen an der sinusförmigen oder auch pendelnden Konturform beschränkten sich jedoch auf grundlegende Untersuchungen seitens der Anlagen- und Komponententechnik.

Wie den dargelegten Quellen zu entnehmen ist, bietet das Schweißen mit überlagerten Bahnbewegungen eine Vielzahl schweißtechnischer Vorteile. Je nach Parameterwahl kann die Nahtgeometrie, das Nahtaussehen und das Schweißtechnische Verhalten (bspw. Verringerung der Spritzerbildung) beeinflusst werden. Zudem bieten die Manipulationsmöglichkeiten am Wärmefeld einen größeren Spielraum um verfahrenstechnische Schwierigkeiten seitens Materialeigenschaften und Bauteilgeometrie zu überwinden.

3 Versuchsvorbereitung

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau für die in dieser Arbeit durchgeführten Schweißversuche ist in Abbildung 1 einzusehen. Zu erkennen sind hierbei die optischen Komponenten zur Strahlführung und -formung wie auch Spann- und Schutzvorrichtungen. Nicht in der Abbildung enthalten sind Strahlquelle und Steuerrechner. Diese befinden sich außerhalb der Umhausung des Arbeitsraumes.

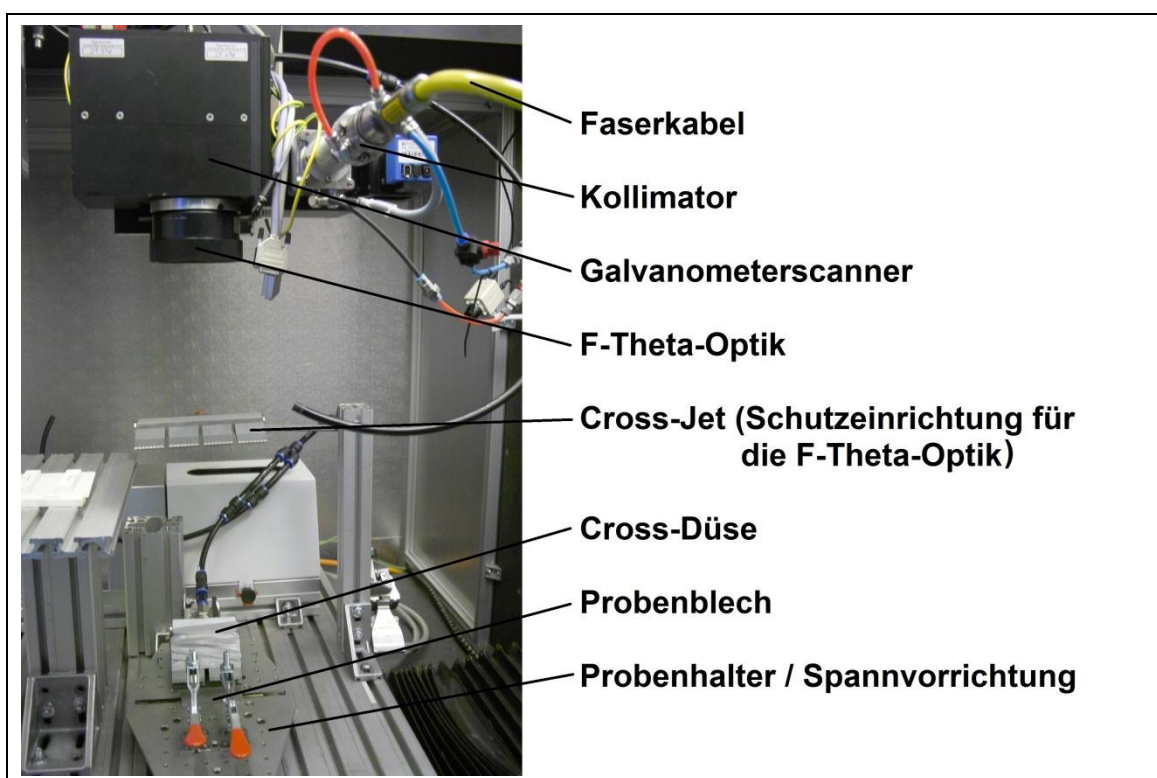


Abbildung 1: Experimenteller Versuchsaufbau

3.1.1 Strahlquelle

Für die experimentellen Schweißversuche wurde ein diodengepumpter 3 KW Monomode Faserlaser der Firma IPG Photonics verwendet, wie er in Abbildung 2 einzusehen ist. Er wurde sowohl für industrielle Anwendungen wie auch den Gebrauch in Forschungsbereichen entwickelt. Dieser wassergekühlte Laser, mit der Bezeichnung YLR-3000-SM, arbeitet mit einer Ytterbium dotierten Doppelkernfaser (engl.: double clad fibers) und erzeugt Laserstrahlung in einem

Wellenlängenbereich zwischen 1068 nm und 1080 nm. Sein Leistungsbereich wird zwischen 300 W und 3000 W bei einer Strahlqualität von $M^2 = 1,1$ bis 1,25 angegeben. [9] Die Ansteuerung des Gerätes erfolgte während der Versuche über die Steuersoftware LaserNet.



Abbildung 2: Strahlquelle – IPG Photonics YLR-3000-SM

3.1.2 Optische Komponenten zur Strahlformung und -führung

Kollimator

Verwendet wurde ein Kollimator der Firma HighYag mit einer Brennweite von 272 mm. Die Funktion des Kollimators ist die Parallelisierung der aus dem Faserkabel stammenden Laserstrahlung. Der so erzeugte Rohstrahl hatte einen Durchmesser von 16 mm.

Galvanometerscanner

Bei dem verwendeten Galvanometerscanner handelt es sich um ein 2-Achsen-Laserstrahlumlenksystem der Firma Raylase, mit dem über drehbare Spiegel der Laserstrahl auf einem Scanfeld von 140x140 mm positioniert werden kann. Auf Grund hoher Rotations- bzw. Positioniergeschwindigkeiten der Ablenkspiegel erreicht der Scanner vom Typ Superscan-LD-30, bei einer Brennweite von $f = 500$ mm, Relativgeschwindigkeiten zwischen Laserstrahl und Werkstück von bis zu 43 m/s (2580 m/min) [10]

F-Theta-Optik

Zur Fokussierung des Rohstrahls wurde die F-Theta-Optik S4LFT1500/328 der Firma SILL Optics mit einer Brennweite von $f = 500$ mm verwendet. Diese Optik ist für Wellenlängen zwischen $\lambda = 1030$ nm und $\lambda = 1090$ nm ausgelegt. Aufgabe der F-Theta-Optik ist den Laserstrahl auf gesamten Scanfläche zu fokussieren. Der maximal Scanbereich der Optic hat die Abmessungen 340x340 mm [11]

3.1.3 Cross-Jet, Cross-Düse, Spannvorrichtung

Cross-Jet

Bei dem sogenannten Cross-Jet handelt es sich um eine Düsenanordnung, die einen breit gefächerten Luftstrom, oberhalb des Werkstücks bzw. Probenmaterials erzeugt. Wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, wurden hierfür vier Flachstrahldüsen der Firma Silvent, vom Typ 920, verwendet. Der Zweck dieses Luftstroms ist der Schutz der für die Schweißversuche verwendeten Komponenten, respektive der F-Theta-Optik vor Schweißspritzern, Funken oder Schmauch.

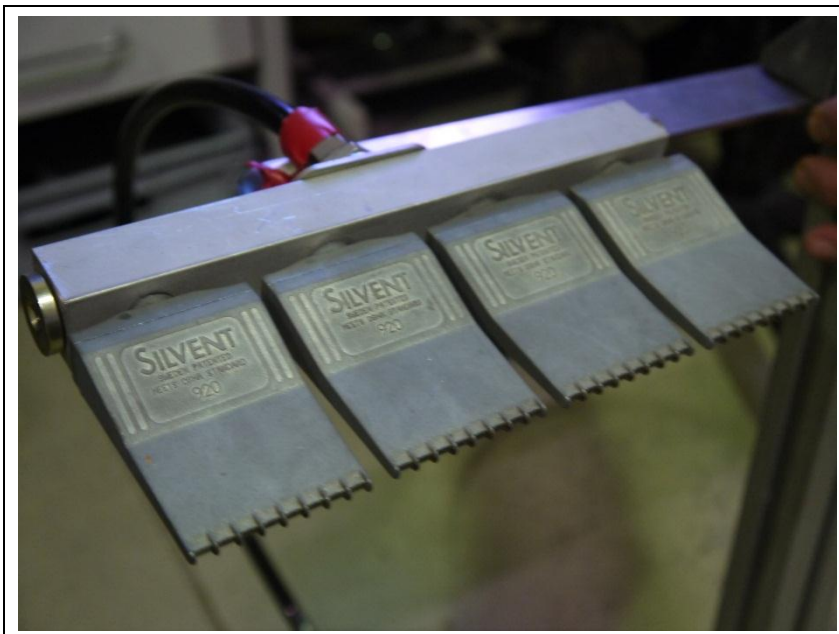


Abbildung 3: Cross-Jet

Cross-Düse

Die Cross-Düse ist wie der Cross-Jet eine Baugruppe aus vier Silvent Flachstrahldüsen vom Typ 920. Ihre Funktion ist, der beim Schweißen entstehenden Dampf-Plasmafackel entgegenzuwirken, die einen Teil des Laserstrahls absorbiert. Sie wird durch den Luftstrom weggeblasen.

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, wurden hierfür je zwei Düsen miteinander verbunden um ein möglichst hohen Volumenstrom zu konzentrieren. Da bei den Versuchen kein bewegendes Achsensystem verwendet wurde, das die Cross-Düse an der Schweißposition mitführt, wurde sie mit einer Breite von über 80 mm konzipiert. Auf diese Weise wirkt der Luftstrom auf der gesamten Länge der Probenbleche.

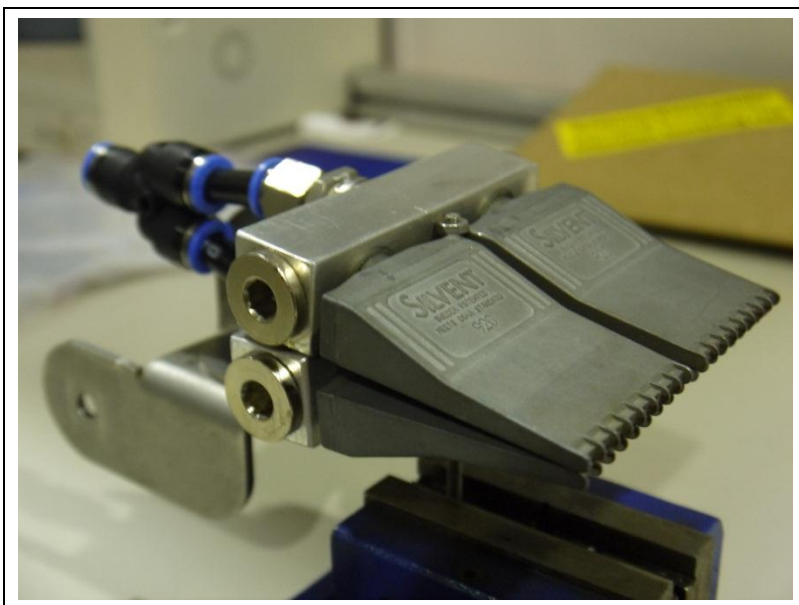
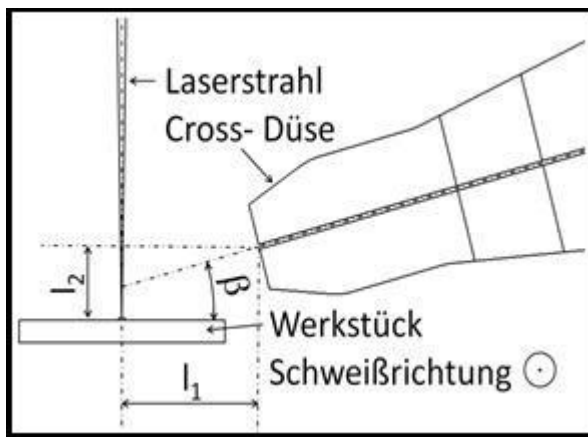


Abbildung 4: Cross-Düse

Für die Schweißversuche wurde die C1-Position, rechtwinklig zur Schweißvorschubrichtung nach Schwind [1] verwendet. Untersuchungen mit verschiedenen Düsenpositionen zeigten, dass die C1-Positionierung sich günstig auf die erreichbare Schweißgeschwindigkeit auswirkt.

Auf Grund der Laserführung durch den Galvanometerscanner und der einstellbaren Düsenhalterung konnte die Positionierung, wie sie in Abbildung 5 [1] dargestellt ist, problemlos eingehalten werden.



C1-Positionierung

$$l_1 = 20 \text{ mm}$$

$$l_2 = 4,6 \text{ mm}$$

$$\beta = 15^\circ$$

Abbildung 5: Positionierung der Cross-Düse [1]

Probenhalter / Spannvorrichtung:

Im Vorfeld zu den Schweißversuchen wurde die in Abbildung 6 dargestellte Spannvorrichtung konzipiert und angefertigt. Hauptaugenmerk lag hierbei auf einer definierten Positionierung der Probenbleche bei Stumpfstoßschweißungen trotz ungeschliffener Körperkanten.

Weiterhin sollte die Spannvorrichtung bei unterschiedlichen Probengeometrien wie auch Stoßarten einsetzbar sein. Überdies musste gewährleistet werden, dass die Positionierung der Cross-Düse auch bei geringen Abständen zu Keyhole¹ und Dampf-Plasmafackel gewährleistet bleibt. Eine möglichst niedrige Verspannung der Probenbleche war daher unabdingbar. Über eine Einstellschraube kann eine mikrometergenaue Justage vorgenommen und eine Winkelverschiebung von $\pm 7,5^\circ$ zur X-Achse (Strahlvorschubrichtung) eingestellt werden.

Zur Einbringung einer ausreichend hohen Klemmkraft, die ein horizontales Verutschen verhindert, wurden zwei Vertikal-Schnellspanner vom Typ 225-U der Firma Destaco mit jeweils $F = 2220 \text{ N}$ verwendet [12]. Zusätzlich mussten die mitgelieferten Andruckspindeln vom Typ 225208-M mit einem „weichen“ Neopren-Kopf gegen den Typ 507206-M mit einem Kopf aus verzinktem Stahl ausgetauscht werden. Bei den Neopren-Köpfen kam es sowohl zu einem horizontalen

¹ Keyhole: Beim Laserschweißen erzeugt der ins Material eindringende Laserstrahl eine relativ dünne aber tiefe Dampfkapillare. Diese Dampfkapillare wird auf Grund ihrer charakteristischen Form im Allgemeinen auch als Keyhole bezeichnet

Verrutschen der Probenbleche als auch zu einem Schmoren durch die Temperaturen bei der Bearbeitung.

Die Spannvorrichtung ist in Abbildung 6 mit einem eingelegten 3 mm dicken Schutzblech zu erkennen. Das beigefügte Schutzblech ermöglichte eine Vor- und Nachlaufstrecke von bis zu 100 mm.

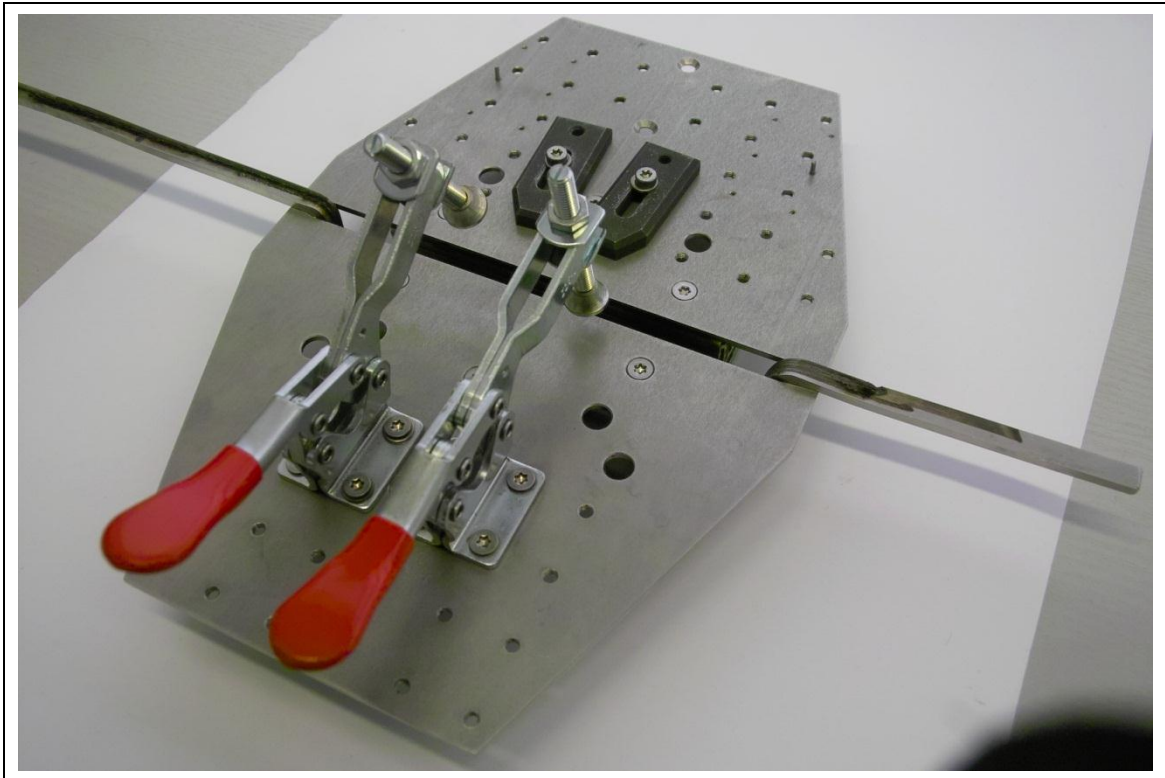


Abbildung 6: Spannvorrichtung

3.2 Ermittlung der Strahlcharakteristika

3.2.1 Strahlvermessung

Vor Beginn der Schweißversuche wurde zunächst eine Strahlvermessung durchgeführt. Dies ist notwendig um die Strahlkaustik bzw. die räumlichen Strahleigenschaften des Lasers zu quantifizieren.

Die Strahlvermessung erfolgte unter Verwendung der in Abschnitt 3.1.2 aufgeführten Bearbeitungsoptik der Firma SILL OPTICS mit einer Brennweite von $f = 500 \text{ mm}$ und dem Strahldiagnosegerät MicroSpotMonitor der Firma Primes.

Die Ergebnisse dieser Strahlvermessung sind Tabelle 2 zu entnehmen. Überdies ist in Anlage A die Ergebnisdarstellung einzusehen, wie sie von der Diagnosesoftware ausgegeben wurde.

Tabelle 2: Durch Strahlvermessung ermittelte räumliche Strahlparameter

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
$d_{0,86}$	Fokusbereich	65	μm
M^2	Beugungsmaßzahl	1,55	-
z_R	Rayleighlänge	2,063	mm

Anhand der Strahlvermessung ist zu erkennen, dass der Fokusbereich, also der Strahldurchmesser an der Position der stärksten Fokussierung $65 \mu\text{m}$ beträgt. Diese Position wird auch als Strahltaile bezeichnet. Auf Grund der gaußförmigen Intensitätsverteilung des Laserstrahls wird das Durchmesser-Symbol mit dem Index „0,86“ erweitert. Dies weist darauf hin, dass 86 % der applizierten Intensität innerhalb des Strahlfleckquerschnitts eingebracht wird [13]. Der Strahlfleckquerschnitt kann nach Gl. 3-1 berechnet werden.

$$A_{d0,86} = \left(\frac{d_{0,86}}{2} \right)^2 * \pi \quad \text{Gl. 3-1}$$

mit: $A_{d0,86}$... Strahlfleckquerschnitt
 $d_{0,86}$... Fokusbereich

Anhand der Rayleighlänge wird angegeben, mit welchem Abstand zur Fokusebene, entlang der optischen Achse des Laserstrahls, sich die Querschnittsfläche des Laserspots verdoppelt. Jedoch kann unter Anwendung von (Gl. 3-2) mit Beugungsmaßzahl und der Wellenlänge des Lasers der Fokusbereich bei jedem Abstand zur Strahlmitte berechnet werden.

$$d_{0,86}(z) = d_{0,86} * \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda * M^2 * z}{\pi * d_{0,86}^2} \right)^2} \quad \text{Gl. 3-2}$$

mit: $d_{0,86}(z)$... Spotdurchmesser bei Abstand zur Fokusebene

$d_{0,86}$... Fokusbereich

λ ... Wellenlänge des Lasers

M^2 ... Beugungsmaßzahl

z ... Abstand zur Fokusebene

3.2.2 Leistungsmessung

Da der Laserstrahl von der Strahlquelle bis zur Werkstückoberfläche verschiedene Strahlführungs- und -formungskomponenten durchläuft, kommt es zu Leistungsverlusten. Um diese zu bestimmen und die tatsächlich ins Werkstück applizierte Laserstrahlleistung zu ermitteln wurde eine Leistungsmessung vor Beginn der Versuche durchgeführt.

Hierfür wurden verschiedene Laserstrahlleistungen an der Strahlquelle eingestellt und die tatsächliche Laserstrahlleistung nach passieren der Strahlführungs- und -formungskomponenten gemessen, wie sie in Abschnitt 3.1.2 aufgeführt sind. Die Ergebnisse dieser Leistungsmessung sind der Abbildung 7 zu entnehmen.

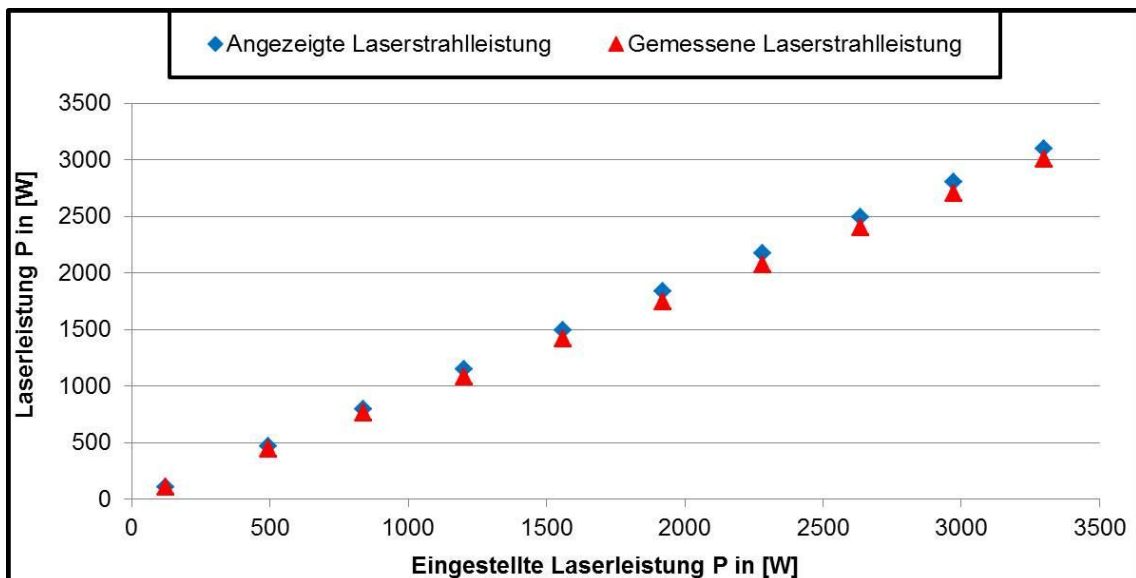


Abbildung 7: Leistungsmessung am verwendeten 3 KW Monomode Faserlaser

Bei der „angezeigten Laserstrahlleistung“ in Abbildung 7 handelt es sich um die Werte, die von einer internen Leistungsmessung des verwendeten Faserlasers ausgegeben wurden.

Die gemessenen Laserstrahlleistungen nach Galvanometerscanner und F-Theta-Optik belegen, dass 91,25 % der eingestellten Laserstrahlleistung an der Bearbeitungsposition ankommen. Da sämtliche Schweißversuche mit einer im Steuerprogramm eingestellten Leistung von $P = 3000 \text{ W}$ durchgeführt wurden, beträgt die applizierte Laserstrahlleistung somit $P = 2737,5 \text{ W}$.

Anhand der räumlichen Strahleigenschaften aus Abschnitt 3.2.1 wie dem Fokusbereich und der tatsächlich eingebrachten Laserstrahlleistung kann die aufs Probenmaterial eingebrachte Intensität nach (Gl. 3-3) berechnet werden

$$I_0 = \frac{8 * P}{d_{0,86}^2 * \pi} \quad \text{Gl. 3-3}$$

mit: I_0 ... Spitzenintensität
 P ... Laserstrahlleistung
 $d_{0,86}$... Fokusbereich

3.3 Charakterisierung der Schweißproben

3.3.1 Probenmaterial

Für die Untersuchungen wurden zwei verschiedene Stahlsorten verwendet. Im Folgenden wird auf die Bezeichnung, Verwendung, die chemische Zusammensetzung, sowie die mechanischen Eigenschaften der Stähle eingegangen. Um die in diesem Abschnitt dargestellten Gefügebilder zu erhalten, wurden Stahlproben der jeweiligen Materialien nach [14] zunächst poliert und im Anschluss mit einer Beraha-2-Lösung geätzt. Da es sich hierbei um eine sogenannte „Nassätzung“ handelt, ist darauf zu achten, dass die Proben nach dem Polieren möglichst direkt und noch feucht geätzt werden.

X5CrNi18-10

Der Stahl X5CrNi18-10, mit der Werkstoffkennzahl 1.4301, ist ein säure- und rostbeständiger Stahl. Wie in der Abbildung 8 zu erkennen ist, weist der Stahl im Anlieferungszustand ein voll-austenitisches Gefüge auf.

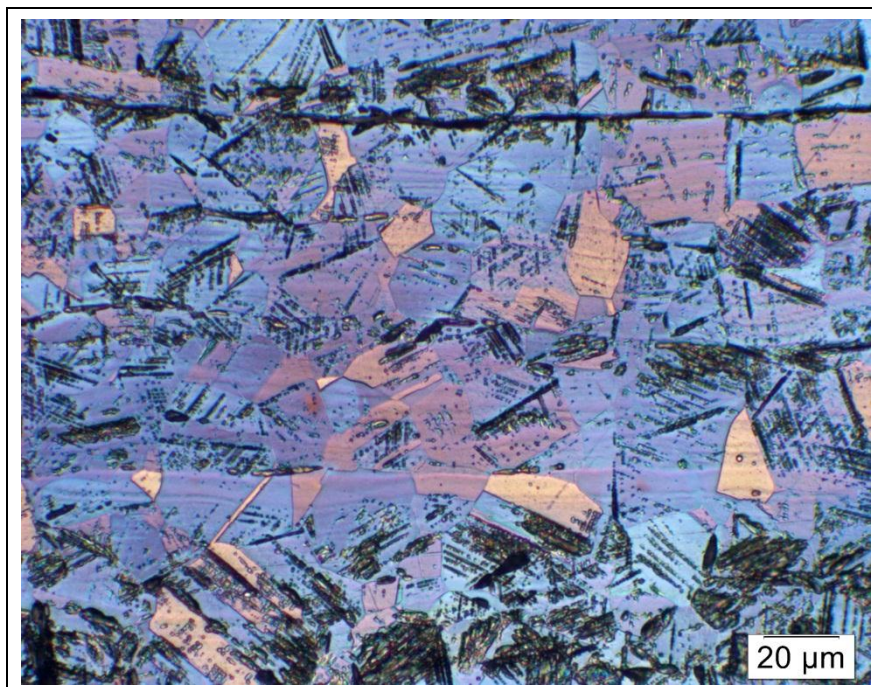


Abbildung 8: Gefüge des Grundwerkstoffes X5CrNi18-10

Im Anschluss an das Walzverfahren zur Erstellung von Blech- und Brammenhalbzeugen sind ebenfalls Anteile an Verformungsmartensit zu erkennen. Durch einen hohen Reinheitsgehalt an Begleitelementen, wie beispielsweise Phosphor und Schwefel ($\leq 0,025\%$), zählt er auch zu den sogenannten Edelstählen.

Durch seine Korrosionsbeständigkeit wird dieses Material überwiegend in Bereichen verwendet, wo mit einer erhöhten Feuchtigkeit zu rechnen ist. Beispielsweise in der Nahrungsmittelindustrie, Heizungs- und Klimatechnik oder im Rohrleitungsbau. Weiterhin in der Chemie- oder Medizintechnik, dem Maschinen- und Anlagenbau, im Stahlbau aber auch in der Architektur und vielen weiteren Bereichen. Mit einem Produktionsanteil von über 30% gehört er zu den am häufigsten verwendeten nichtrostenden Stählen [15, 16]

Allgemein gelten Edelstähle wie der X5CrNi18-10 als gut schweiß- und umformbar. Auf Grund der weichen und zähen Charakteristik gelten derartige Werkstoffe jedoch als schlecht zerspanbar. Weitere Stoffeigenschaften und Kennwerte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 3: Werkstoffkennwerte des Werkstoffes X5CrNi18-10

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Bruchdehnung	ϵ_{\min}	45	%
Dehngrenze	$R_{p0,2 \min}$	230	N/mm ²
Dichte	δ	7,7	g/cm ³
Härte	-	215	HRC
Zugfestigkeit	R_m	520 - 720	N/mm ²

Die chemische Zusammensetzung des Stahls ist der folgenden Tabelle zu entnehmen. Hierbei liegen die Herstellerangaben der Firma ThyssenKrupp zu Grunde [17]. Eine von Schwind [1] durchgeführte Vakuumemissionsspektroskopie nach DIN 51009 bestätigte die Herstellerangaben. Die Ergebnisse dieser Materialanalyse sind der Anlage B zu entnehmen.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes X5CrNi18-10

Element	Grundwerkstoff Herstellerangaben in [%]
C	≤ 0,07
Si	≤ 1,00
Mn	≤ 2,00
P	≤ 0,045
S	≤ 0,015
Cr	≤ 17,0 -19,5
Ni	≤ 8,0 -10,5
N	≤ 0,11
Mo	-
Nb	-
Ti	-

22MnB5

Bei dem 22MnB5 handelt es sich um einen niedriglegierten Mangan-, Borstahl. Er gehört zur Gruppe der Vergütungsstähle. Weiterhin wird dieses Material als sogenannter Presshärter bezeichnet. Im Anlieferungszustand weist dieser Werkstoff ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit Anteilen von Karbiden auf. Wird dieser Stahl warmumgeformt, beispielsweise in einem Presswerkzeug, kommt es zu einer martensitischen Umwandlung und es bildet sich ein härteres Gefüge. Die Probenbleche aus 22MnB5 lagen im vergüteten Zustand vor. Überdies wiesen sie eine ca. 30 µm dicke Zinkschicht auf, wie in Abbildung 9 zu erkennen ist.

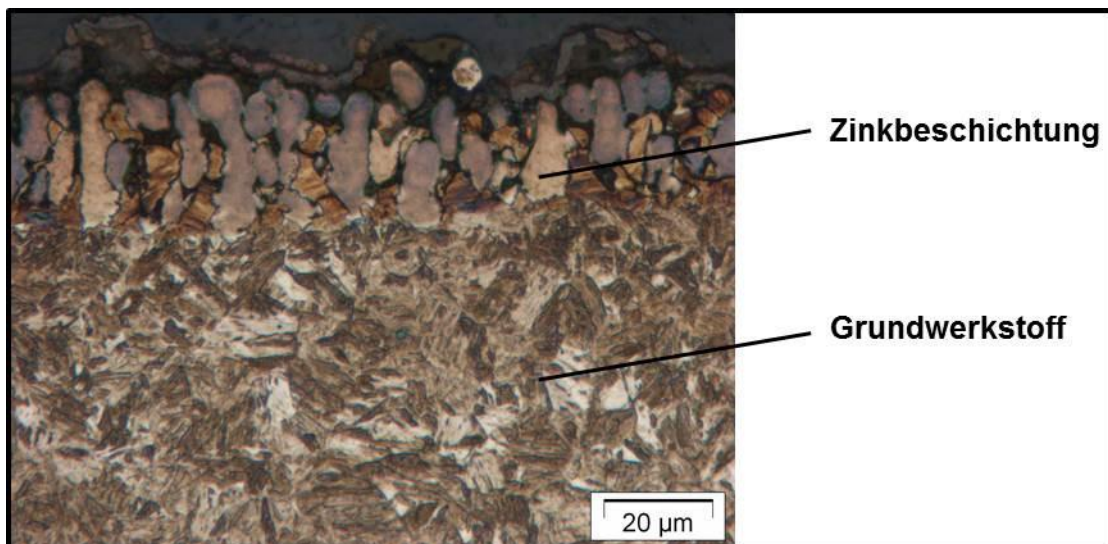


Abbildung 9: Gefüge des Grundwerkstoffes 22MnB5 mit Zinkbeschichtung

Überwiegend wird dieses Material in der Automobilindustrie verwendet, da es zunächst im Lieferzustand als gut Verformbar gilt. Wird dieser Stahl Umgeformt erhöht sich dessen Zugfestigkeit auf bis zu 1650 N/mm². Aus diesem Grund eignet es sich besonders für kraftaufnehmende Komponenten wie Stoßfänger oder Karosserieelemente und -verstärkungen [18].

Obwohl dieser Stahl mit allen gängigen Verfahren als schweißbar erachtet wird, ist zu empfehlen Belastungen und Kräfte vorwiegend nicht an den Fügstellen auftreten zu lassen. Weitere Stoffeigenschaften und Kennwerte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 5: Werkstoffkennwerte des Werkstoffes 22MnB5

Bezeichnung	Formelzeichen	Wert	Einheit
Bruchdehnung	ϵ_{\min}	5	%
Dehngrenze	$R_{p0,2 \min}$	1100	N/mm ²
Dichte	δ	7,9	g/cm ³
Härte	-	215	HV10
Zugfestigkeit	R_m	≥500	N/mm ²
Zugfestigkeit (vergütet)	R_m	≥1500	N/mm ²

Die chemische Zusammensetzung ist der folgenden Tabelle zu entnehmen. Hierbei liegen die Herstellerangaben der Firma Salzgitter Flachstahl GmbH [19]

zu Grunde. Wie bereits bei dem Edelstahl X5CrNi18-10 wurde das Probenmaterial 22MnB5 von Schwind [1] durch eine Vakuumemissionsspektroskopie nach DIN 51009 analysiert. Die Ergebnisse bestätigten zum Großteil die Herstellerangaben und können Anlage C entnommen werden.

Tabelle 6: Chemische Zusammensetzung des Werkstoffes 22MnB5

Element	Grundwerkstoff Herstellerangaben in [%]
C	≤ 0,25
Mn	≤ 1,4
Si	≤ 0,4
P	≤ 0,025
S	≤ 0,01
Ti	≤ 0,05
Cr	≤ 0,5
Mo	≤ 0,5
B	≤ 0,005
Ni	-
O	-
Fe	Rest
Zn	-

3.3.2 Probengeometrie und Probenhandling

Für die Versuchsschweißungen mit dem Edelstahl X5CrNi18-10 wurden die drei Materialdicken 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm verwendet. Die Untersuchungen am 22MnB5 wurden lediglich an einer Materialstärke von 1,6 mm durchgeführt. Die verschiedenen Probengeometrien sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 7: Auflistung der verschiedenen Probengeometrien

Material	Schweißprozess	Probengeometrie
X5CrNi18-10	Blindschweißung	30 x 80 mm
	Stumpfstoßschweißung	15 x 80 mm
	Blindschweißung für Zugversuch	200 x 140 mm
	Stumpfstoßschweißung für Zugversuch	100 x 140 mm
22MnB5	Blindschweißung	20 x 80 mm
	Stumpfstoßschweißung	20 x 80 mm
	Blindschweißung für Zugversuch	175 x 70 mm
	Stumpfstoßschweißung für Zugversuch	87,5 x 70 mm

Nahtvorbereitung

Für ein erfolgreiches Verbindungsschweißen im Stumpfstoß sind zumeist präzise Ausrichtarbeiten wie auch geschliffene Körperkanten notwendig [1, 10]. Das Schweißen geometrisch bestimmter Konturformen sollte daher sowohl auf die Fähigkeit zur Spaltüberbrückung wie auch den Ausgleich von Kantenversatz und Positionierabweichungen untersucht werden. Aus diesem Grund wurden für die Schweißversuche nur Probenbleche mit lasergeschnittenen Körperkanten verwendet. Somit weisen die Körperkanten eine durchschnittliche Oberflächenrauheit von 40 bis 50 µm auf [20]. Über Spaltvermessungen mit je 20 regelmäßig verteilten Messungen wurde ein durchschnittliches Spaltmaß von 48 µm ermittelt.

Spannvorgang

Sämtliche Schweißversuche wurden mit der in Abschnitt 3.1.3 aufgeführten Spannvorrichtung durchgeführt (siehe Abbildung 6). Probenbleche für Blindschweißungen werden mittig über der Schweißposition aufgelegt und durch die Vertikal-Schnellspanner auf der Vorderseite und Niederhalter auf der Rückseite fixiert.

Um eine exakte Positionierung der zu verschweißenden Körperkanten bei einer Stumpfstoßschweißung zu gewährleisten, muss eine bestimmte Abfolge beim

Spannvorgang eingehalten werden. Zunächst wird ein Probenblech aufgelegt und von Hand gegen einen herausnehmbaren Anschlag gedrückt. Das Blech wird nun durch die Vertikal-Schnellspanner fixiert und der Anschlag entnommen. Hierdurch wird die Körperkante mit der Schweißposition gleichgesetzt. Das zweite Blech wird nun gegen das Fixierte gedrückt und durch das Festschrauben von zwei Niederhaltern befestigt. Durch diese Abfolge beim Verspannen der Probenbleche kann stets die gleiche Positionierung der zu verschweißenden Körperkanten gewährleistet werden.

4 Experimentelle Untersuchung

4.1 Untersuchungen zu oszillierender Strahlführung

4.1.1 Erläuterung der Konturform

Bei der Wobbelkontur handelt es sich um eine durch oszillierende Strahlbewegung erstellte Konturform. Der Begriff leitet sich aus dem englischen „wobblen“ ab. Obwohl dieser Begriff auf Deutsch übersetzt „wackeln oder wankeln“ bedeutet, hat er sich speziell bei der Benennung von oszillierten Nahtkonturen etabliert.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war es mit der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik nicht möglich die Vorschubbewegung in X-Richtung durch eine Achsenbewegung in der angestrebten Geschwindigkeit zu realisieren. Aus diesem Grund wurden sowohl die lineare Vorschubbewegung als auch die Strahlauslenkung zur Erzeugung der Konturform durch den Galvanometerscanner bewerkstelligt.

Obwohl das Steuerprogramm des Scanners „LasPaint“ bereits über eine Wobbelfunktion verfügt, konnte diese nicht verwendet werden. Eine genauere Untersuchung zeigte, dass der Scanner hierüber separate Kreise erstellt und zwischen den einzelnen Wobbeln einen sogenannten Jump durchführt. Also bis zur Position des folgenden Wobbel abgeschaltet wird. Daher wurde mit der zur Verfügung stehenden Wobbelfunktion keine geschlossene Kontur erzeugt. Aus diesem Grund wurde eine selbsterstellte Wobbelform programmiert, wie sie der Abbildung 10 zu entnehmen ist.

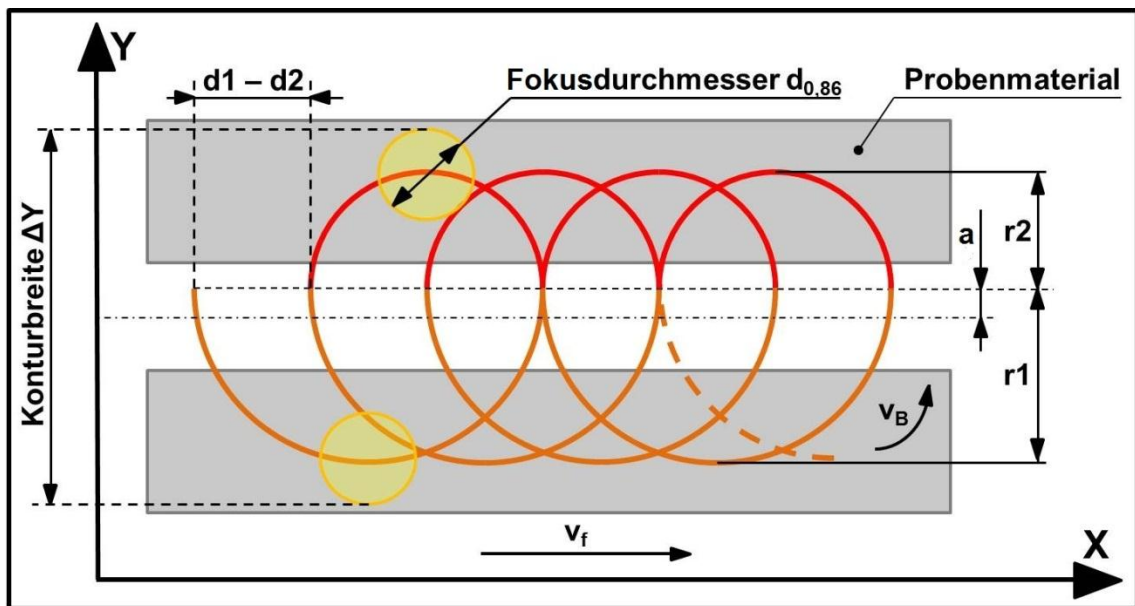


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Wobbelkontur

Die selbsterstellte Kontur setzt sich zusammen aus den zwei unterschiedlich großen Radien r_1 und r_2 . Ein vollständiger Wobbel bedeutet somit einen 360° -Umlauf, wie er in Abbildung 10 einzusehen ist. Die Vorschubbewegung in X-Richtung wird hierbei durch den Größenunterschied zwischen den zwei Radien vollzogen. In dem hierfür erstellten Programm wurden r_1 und r_2 über ein Größenverhältnis verknüpft und r_2 zum einstellbaren Parameter deklariert. Während der Versuche stellte sich ein Größenverhältnis zwischen den Radien von

$$V = \frac{r_2}{r_1} = \frac{2}{3} \approx 0,6667$$

aus Darstellungszwecken als vorteilhaft heraus. Auf Grund dieses Radienverhältnisses schneiden sich im Idealfall die Wobbelumfänge und eine Aussage zur Konturstabilität bei veränderter Radiengröße und Bahngeschwindigkeit kann direkt getätigt werden.

Konturversatz

Da die Wobbelkontur sich aus verschiedengroßen Radien zusammensetzt muss bei der Positionierung der Schweißkontur über dem Fügespalt ein Versatz eingestellt werden, wie er in Abbildung 10 zu erkennen ist. Dieser Konturversatz wurde als „a“ deklariert. Die Grundlegende Formel zur Bestimmung des Konturversatzes ist (Gl. 4-1).

$$a = \left(\frac{r1 + r2}{2} \right) - r2 \quad \text{Gl. 4-1}$$

mit: a ... Konturversatz
 r1 ... großer Wobbelradius
 r2 ... kleiner Wobbelradius

Da die Radien r1 und r2 durch das Größenverhältnis von 2:3 verknüpft wurden und somit $r1 = 3/2 * r2$ ist, kann durch die Substitution von r1 somit (Gl. 4-1) zu (Gl. 4-2) vereinfacht werden.

$$a = \frac{1}{4} * r2 \quad \text{Gl. 4-2}$$

Geschwindigkeiten

Bei der Erzeugung der Wobbelkontur müssen zwei verschiedene Geschwindigkeiten betrachtet werden. Die Vorschubgeschwindigkeit v_f ist die lineare Geschwindigkeitsangabe in Vorschubrichtung bzw. entlang der X-Achse. Die Bahngeschwindigkeit v_B ist die Geschwindigkeit, mit welcher der Laserstrahl zur Erzeugung der Konturform bewegt wird. Bei dieser Bewegung handelt es sich um eine überlagerte Bewegung aus der Vorschubbewegung entlang der X-Achse und den Strahlauslenkungen in Y-Richtung. Da in den folgenden Kapiteln auf eine Differenz zwischen der eingegebenen und der resultierenden Bahngeschwindigkeit eingegangen wird, wurde hierfür eine namentliche Trennung vorgenommen. Die eingestellte Bahngeschwindigkeit (Soll-Wert) wird künftig mit dem Index „_SOLL“ erweitert (v_{B_SOLL}).

4.1.2 Überprüfung der Konturtreue

Es haben sich bereits bei ersten Testschweißungen mit geringen Geschwindigkeiten Komplikationen beim Erstellen der wobbelförmigen Kontur gezeigt. Wie in dem Diagramm in Abbildung 11 zu erkennen ist, führte die Erhöhung der eingestellten Bahngeschwindigkeit zu Abweichungen bei der eingestellten Naht- bzw. Konturbreite ΔY .

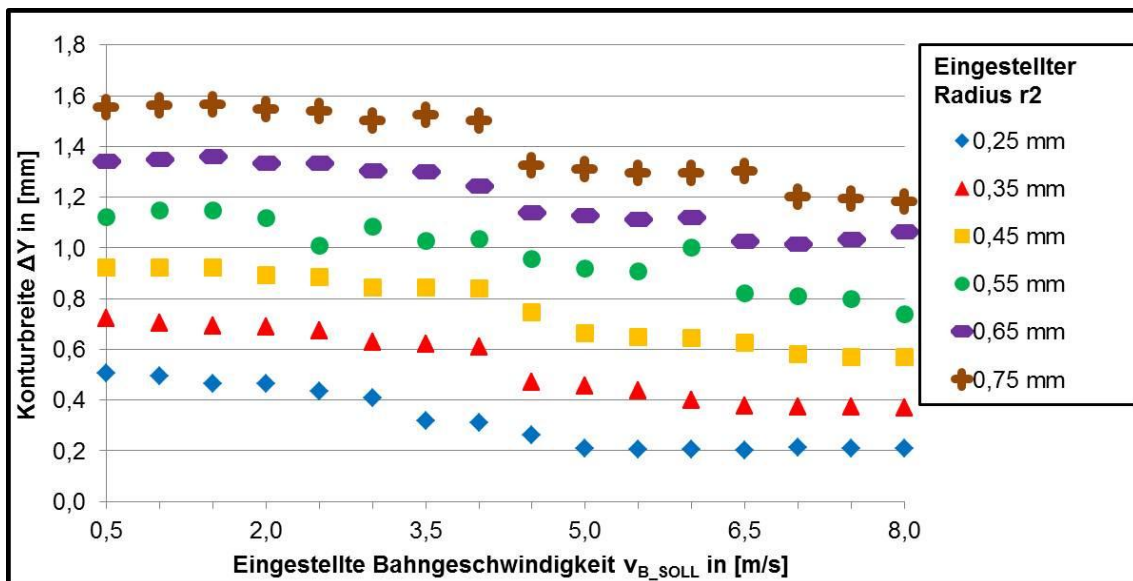


Abbildung 11: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit

Je höher die eingestellte Bahngeschwindigkeit gewählt wurde, desto geringer wurde die gemessene Konturbreite. Wie der Abbildung ebenfalls zu entnehmen ist, handelt es sich hierbei um eine allgemeine Diskrepanz, die bei jeder eingestellten Konturgröße und Bahngeschwindigkeit einen ähnlich starken Einfluss hatte.

Weiterhin kam es zu einer Verringerung des Größenverhältnisses zwischen den Radien r_1 und r_2 . Hierbei hatten, wie es der Abbildung 12 zu entnehmen ist, sowohl die Bahngeschwindigkeit wie auch die eingestellte Radiengröße einen Einfluss. Je größer die Bahngeschwindigkeit bzw. je kleiner der Wobbelradius eingestellt wurde, desto stärker wirkten sich die Abweichungen aus. Das Soll-Radienverhältnis von 0,6667 ist dem Diagramm anhand der gestrichelten Linie zu entnehmen.

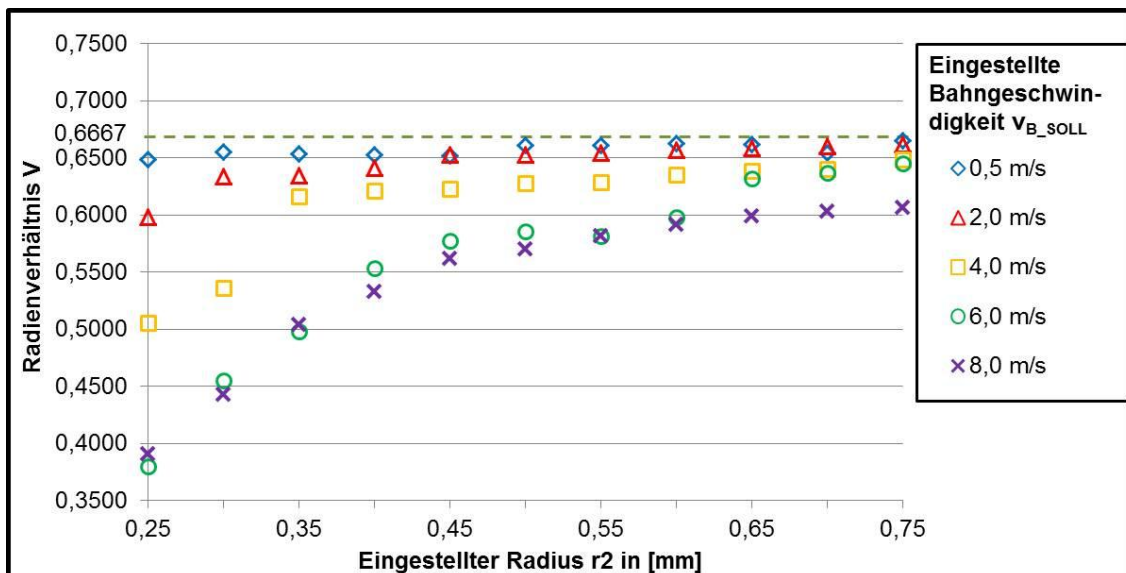


Abbildung 12: Abweichung vom Radienverhältnis in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Wobbelradius

Da das Radienverhältnis von 0,6667 die spezielle Konturform ergibt, wie sie in Abschnitt 4.1.1. erläutert wurde, stellt sich eine Verringerung des Radienverhältnisses anhand eines Auseinanderdriftens der erzeugten Wobbel dar. Dieser Effekt ist in Abbildung 13 zu erkennen. Hierbei handelt es sich um drei Wobbelkonturen, die mit den gleichen geometrischen Parametern $r_2 = 0,65$ mm, $V = 0,6667$ und einer Laserleistung von $P = 300$ W aber mit unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten erzeugt wurden. Zusätzlich zur Verringerung der Konturbreite wird Anhand des Konturenvergleichs das Driften der Wobbel bei nachlassendem Radienverhältnis aufgezeigt.

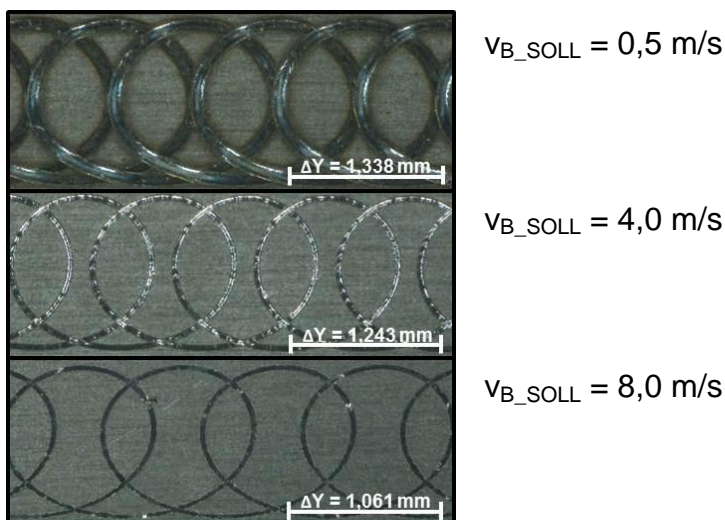


Abbildung 13: Darstellung des Driftverhaltens zwischen den Wobbelradien bei Erhöhung der Bahngeschwindigkeit

Diese Abweichung wirkt sich nachteilig auf verschiedene Punkte aus. Zunächst erschwert eine unvorhersehbare Konturgeometrie das Aufstellen von Prognosen und Thesen zum Schweißprozess wie bspw. zur Schmelzbaddynamik oder dem Wärmeeintrag. Berechnungen und Simulationen werden hierdurch auf Grund unbekannter Faktoren erschwert, sofern sie nicht durch Schätzungen und Annahmen gestützt werden. Überdies führt das Driften zu einem auseinandergezogenen Wärmefeld, und somit zu einer schlechteren Tiefschweißfähigkeit [21].

4.1.3 Strategie zur Korrektur der Konturabweichung

Um sowohl der Konturabweichung wie auch der Maßabweichung zu begegnen war es nötig, die einzugebenden Parameter Radius und Radienverhältnis abzuändern bzw. nachzujustieren. Hierfür mussten zunächst Wobbelkonturen mit den unkorrigierten Eingabeparametern geschweißt und die resultierenden Radienmaße aufgenommen werden. Diese Werte sind für das Berechnungsbeispiel mit einer Bahngeschwindigkeit von $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$ in Tabelle 6 einzusehen.

Mit diesen Werten konnte nun eine Offsetberechnung durchgeführt werden. Hierbei hat sich herausgestellt, dass eine separate Änderung einer der Parameter keine Besserung bei den Abweichungen erbrachte. Erst das simultane Abändern von Radius und Radienverhältnis durch das Addieren mit den berechneten Offset-Werten erzielte die zu erwartenden Maße und Konturformen. Die Korrektur der Konturabweichung erfolgte somit durch eine doppelte Offsetting, wie sie im Folgenden erläutert und an einem Beispiel dargestellt wird.

Tabelle 8: Auflistung der resultierenden Radien bei unkorrigierter Konturerstellung

$v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s} ; P = 300 \text{ W} ; V = 0,6667$						
gemessene Werte				berechnete Werte		
r2 in [mm]	t in [s]	r1_{IST} in [mm]	r2_{IST} in [mm]	V_{IST}	v_B in [m/s]	v_f in [m/s]
0,25	0,175	0,197	0,077	0,3909	0,98	0,29
0,30	0,150	0,260	0,115	0,4432	1,31	0,33
0,35	0,150	0,337	0,170	0,5037	1,51	0,33
0,40	0,125	0,410	0,219	0,5329	1,97	0,40
0,45	0,125	0,492	0,276	0,5615	2,14	0,40
0,50	0,125	0,562	0,321	0,5703	2,22	0,40
0,55	0,125	0,636	0,370	0,5818	2,30	0,40
0,60	0,125	0,706	0,418	0,5914	2,35	0,40
0,65	0,125	0,780	0,467	0,5991	2,41	0,40
0,70	0,125	0,848	0,512	0,6032	2,44	0,40
0,75	0,125	0,915	0,555	0,6063	2,46	0,40
0,80		1,053	0,641	0,6083		
0,85		1,133	0,692	0,6103		
0,90		1,214	0,748	0,6164		
0,95		1,292	0,800	0,6188		
1,00		1,378	0,860	0,6237		

Um bei den folgenden Berechnungen eine Überschneidung bei den Benennungen der eingegebenen, gemessenen und Neuberechneten Parameter bzw. Radienmaße zu vermeiden, wurde eine namentliche Trennung der Faktoren vorgenommen. Dies erfolgte durch die Einführung der Indizes „IST“ für gemessene Ist-Werte und „NEU“ für die korrigierten Eingabeparameter.

Zunächst wird der Offset-Wert für den Radius r2 berechnet. Hierfür muss nach (Gl.-4-3) die ermittelte Abweichung zwischen dem Soll-Wert r2 und dem tatsächlich erzeugten Ist-Wert r2_{IST} dem Eingabewert von r2 hinzuaddiert werden. Mit diesem korrigierten Eingabewert für r2, genannt „r2_{NEU}“, wird nun das zugehörige Radienverhältnis V_{IST} aus Tabelle 6 ausgewählt. Bei diesen Radienverhältnissen handelt es sich um die tatsächlich erzeugten Größenverhältnisse zwischen den gemessenen Wobbelradien r1_{IST} und r2_{IST}.

Da in dieser Tabelle die r2 -Werte zu je 50 µm gestaffelt sind, ist es für die Auswahl des V_{IST}-Wertes notwendig den r2_{NEU}-Wert auf 0,05 mm zu runden.

Korrigierter Eingabewert r_{2NEU}

$$r_{2NEU} = r_2 + (r_2 - r_{2IST}) \quad \text{Gl. 4-3}$$

mit: r_2 ... kleiner Wobbelradius (Soll-Wert)
 r_{2IST} ... gemessener Ist-Wert des Radius r_2
 r_{2NEU} ... korrigierter Eingabewert für den Radius r_2

Beispiel ($v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$; $r_2 = 0,65 \text{ mm}$; $V = 0,6667$):

$$r_{2NEU} = 0,65 \text{ mm} + (0,65 \text{ mm} - 0,467 \text{ mm})$$

$$r_{2NEU} = 0,833 \text{ mm}$$

Gewähltes Radienverhältnis V_{IST}

$$r_{2NEU} \text{ (gerundet)} = 0,85 \text{ mm} \rightarrow V_{IST} = 0,6103$$

Mit dem gewählten V_{IST} -Wert kann jetzt das Offset für das Radienverhältnis berechnet werden. Hierfür wird nach (Gl. 4-4) die Differenz zwischen dem Soll-Wert V und V_{IST} dem Radienverhältnis V hinzuaddiert. Der so berechnete Eingabewert wird „ V_{NEU} “ genannt.

Korrigierter Eingabewert V_{NEU}

$$V_{NEU} = V + (V - V_{IST}) \quad \text{Gl. 4-4}$$

mit: V ... Radienverhältnis (Soll-Wert)
 V_{IST} ... gemessener Ist-Wert des Radienverhältnisses
 V_{NEU} ... korrigierter Eingabewert für das Radienverhältnis

Beispiel ($v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$; $r_2 = 0,65 \text{ mm}$; $V = 0,6667$):

$$V_{NEU} = 0,6667 + (0,6667 - 0,6103)$$

$$V_{NEU} = 0,7231$$

Die so berechneten Parameter r_{2NEU} und V_{NEU} sind die korrigierten Eingabewerte für Wobbelradius und Radienverhältnis. Über dieses Offsetverfahren konnte eine Minimierung der beiden Abweichungen erreicht werden.

Wie in Abbildung 14 zu erkennen ist, konnte die Maßabweichung nicht vollständig unterbunden aber verringert werden. Speziell in den Bereichen mit erhöhter Bahngeschwindigkeit entsprachen nun die erzeugten Konturbreiten den einge-

stellten Werten. Die korrigierten Eingabeparameter können den Anlagen D und E entnommen werden.

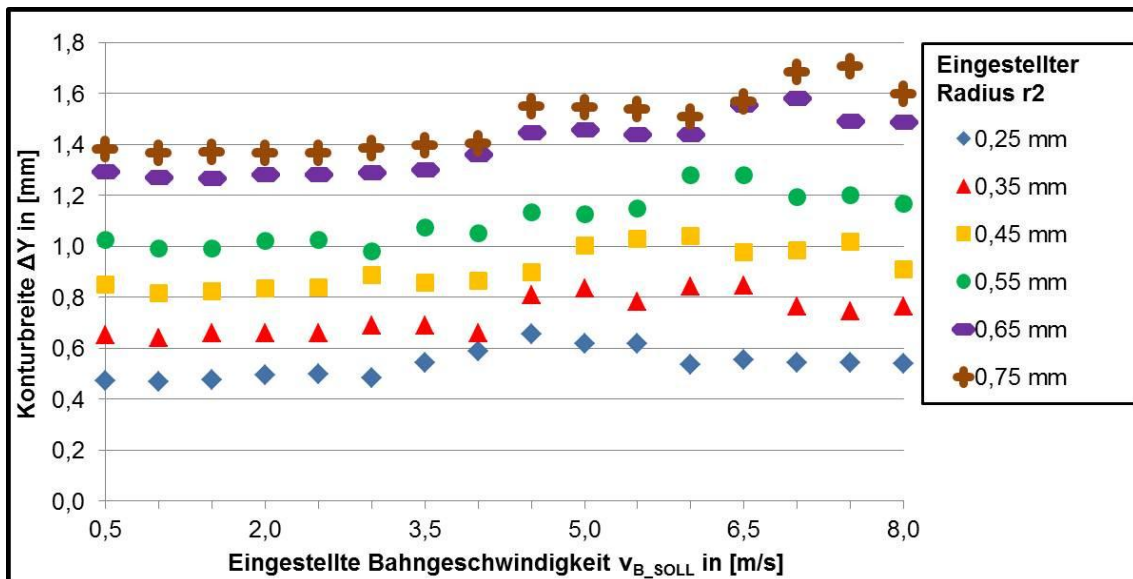


Abbildung 14: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter

Sehr effektiv stellte sich das Anpassen der einzugebenden Werte hinsichtlich der Formabweichung dar. Das Auseinanderdriften der Wobbel wurde vollständig beseitigt. Dies zeigt sich besonders im Vergleich von Abbildung 12 mit Abbildung 15. Sowohl der negative Einfluss kleinerer Wobbelradien wie auch erhöhter Bahngeschwindigkeit konnte vermieden werden. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, befinden sich sämtliche Messwerte um das Soll-Größenverhältnis von 0,6667.

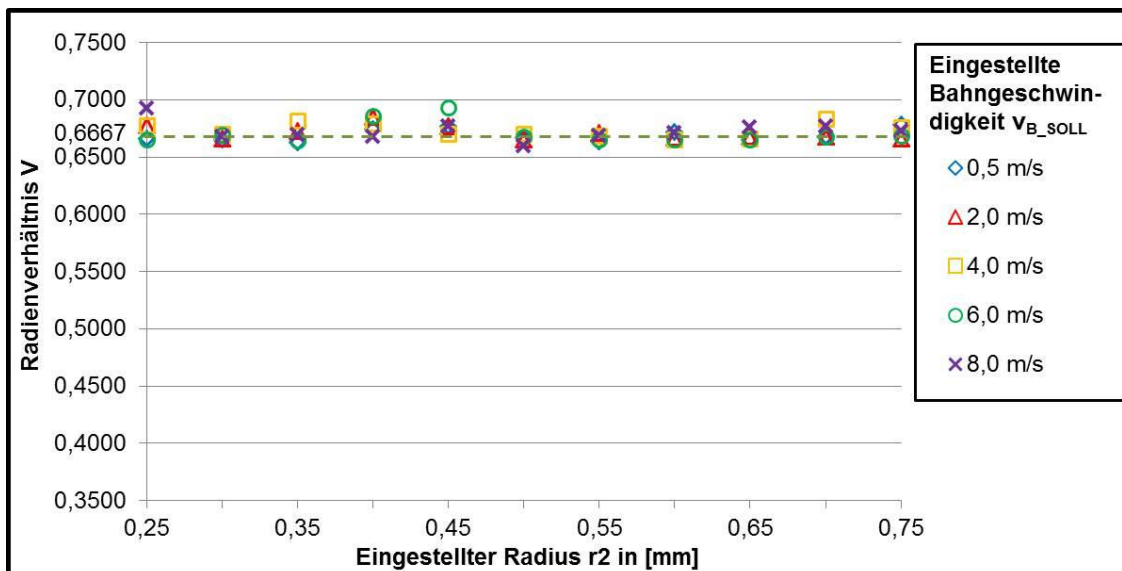


Abbildung 15: Abweichung vom Radienverhältnis in Abhängigkeit von Bahngeschwindigkeit und Wobbelradius nach Korrektur der Eingabeparameter

4.1.4 Ermittlung erreichbarer Geschwindigkeiten und Frequenzen

Wie in der schematischen Darstellung in Abschnitt 4.1.1. (Abbildung 10) zu erkennen ist, sind bei der Erzeugung geometrisch bestimmter Konturformen zwei Bewegungen beteiligt. Somit müssen auch zwei verschiedene Geschwindigkeiten untersucht werden. Hierbei handelt es sich um die Bahngeschwindigkeit v_B und die lineare Vorschubgeschwindigkeit v_f , die in den folgenden Abschnitten separat betrachtet werden.

4.1.4.1 Bahngeschwindigkeit

Im Idealfall ist die resultierende, berechnete Bahngeschwindigkeit gleich der eingestellten Bahngeschwindigkeit. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass auf Grund von Beschleunigungs- und Abbremsstrecken, die bei den Untersuchungen außer Acht gelassen wurden, von einer mittleren Bahngeschwindigkeit gesprochen wird. Sie wird nach (Gl. 4-5) berechnet durch die Division der Bahnlänge geteilt durch die gemessene Bearbeitungszeit.

$$v_B = \frac{l_B}{t}$$

Gl. 4-5

mit: l_B ... Bahnlänge
 t ... gemessene Bearbeitungszeit

Die Bahnlänge wird nach (Gl.4-6) aus der Menge an Wobbeln berechnet, die zum Erreichen der Nahtlänge erzeugt werden, multipliziert mit der Summe der Teilumfänge aus den Radien r_1 und r_2 .

$$l_B = M_W * (r_{1IST} * \pi + r_{2IST} * \pi)$$

Gl. 4-6

mit: M_W ... Wobbelmenge
 r_{1IST} ... gemessener Wert des großen Radius (Ist-Wert)
 r_{2IST} ... gemessener Wert des kleinen Radius (Ist-Wert)

Unter Anwendung der (Gl.4-7) kann die Menge der Wobbel berechnet werden, die zur Erzeugung einer Schweißnaht definierter Länge erstellt werden.

$$M_W = \frac{l_N}{r_2}$$

Gl. 4-7

mit: l_N ... Schweißnahtlänge
 r_2 ... Wobbelradius r_2 (Sollwert)

Vor der Korrektur der Maß- und Formungengenauigkeit stellten sich die ermittelten Bahngeschwindigkeiten wie in Abbildung 16 dar.

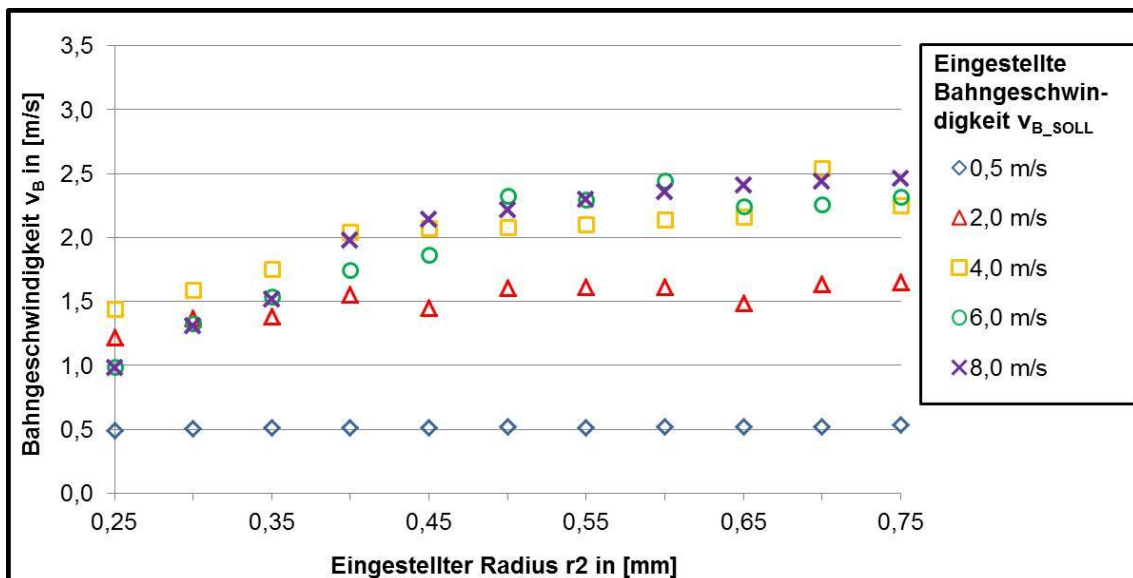


Abbildung 16: Darstellung der resultierenden Bahngeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit

Es ist zu erkennen, dass eine Erhöhung der eingestellten Bahngeschwindigkeit oberhalb von $v_{B_SOLL} = 4,0 \text{ m/s}$ keinen bzw. nur einen minimalen Effekt zur Folge hatte. Dies beruhte hauptsächlich darauf, dass der Galvanometerscanner bei kleinen Geometrien begrenzter in den erreichbaren Geschwindigkeiten ist. Durch die in Abschnitt 4.1.2 dargelegten Verringerungen der Wobbelmaße bei steigender Bahngeschwindigkeit ergab sich die in Abbildung 16 erkennbare Begrenzung.

Da über die Neuberechnung der einzugebenden Parameter r_2 und V eine Kontur- und Maßstabilität erreicht wurde, ist ebenfalls eine Steigerung der Bahngeschwindigkeit eingetreten, wie es im Vergleich der Abbildungen 16 und 17 zu erkennen ist.

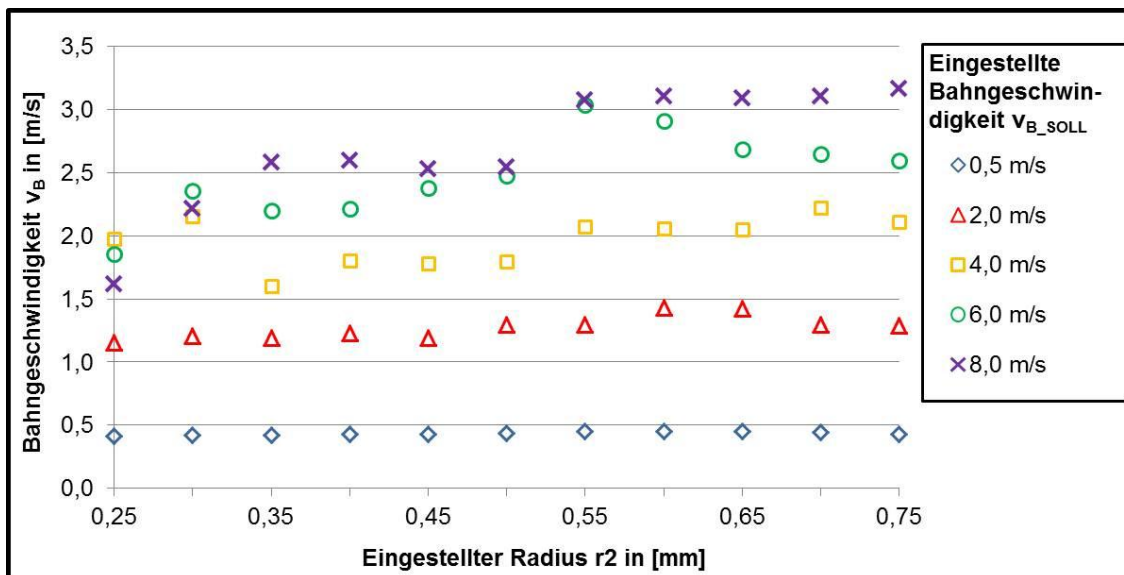


Abbildung 17: Darstellung der resultierenden Bahngeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter

Der Abbildung 17 ist zu entnehmen, dass die resultierende Bahngeschwindigkeit bereits bei einer eingestellten Bahngeschwindigkeit von 0,5 m/s nicht erreicht wurde. Weiterhin vergrößert sich mit Erhöhung der Bahngeschwindigkeit die Abweichung zwischen eingegebener Soll-Bahngeschwindigkeit und der tatsächlich erreichten Bahngeschwindigkeit. Die erkennbare Geschwindigkeitsbegrenzung zwischen 2,0 und 3,25 m/s, je nach Radiengröße, belegen eindeutig die erreichbaren Verfahrensgeschwindigkeiten des Laserstrahls bei Erzeugung der wobbelförmigen Kontur. Nach [10] beträgt die maximale Spitzengeschwindigkeit des Scanners, bei geradliniger Strahlbewegung und dem Einsatz der F-Theta-Optik mit einer Brennweite von $f = 500$ mm, 43 m/s (2580 m/min). Somit wurden lediglich 4,65 % bis 7,56 % der angegebenen Spitzengeschwindigkeit erreicht.

4.1.4.2 Lineare Vorschubgeschwindigkeit

Im Vergleich mit den Bahngeschwindigkeiten ist bei den linearen Vorschubgeschwindigkeiten mit wesentlich geringeren Geschwindigkeiten zu rechnen. Dies ist auf die erhöhte Spurlänge durch die wobbelförmige Kontur zurückzuführen. Die Spur- bzw. Nahtlänge der Wobbelkontur entspricht nach (Gl. 4-8) etwa dem 7,85-fachen der linearen Nahtlänge. Die Herleitung der (Gl. 4-8) ist Anlage F zu entnehmen. Im selben Verhältnis wie Bahn- zu Nahtlänge ist jede gemessene Vorschubgeschwindigkeit langsamer als die berechneten Bahngeschwindigkeiten. Dies belegt, dass die verschiedenen Bewegungen und somit die Geschwindigkeiten verknüpft sind. Aus diesem Grund üben Wobbelradius und eingestellte Bahngeschwindigkeit den gleichen Einfluss auf die Vorschubgeschwindigkeit aus, wie auf die resultierenden Bahngeschwindigkeiten (siehe Abschnitt 4.1.4.1.). Dies wird im Vergleich von Abbildung 17 und Abbildung 18 belegt. Die maximal erreichten Vorschubgeschwindigkeiten lagen zwischen 0,25 m/s und 0,40 m/s, je nach erzeugter Konturgröße und einer eingestellten Bahngeschwindigkeit von 8,0 m/s.

$$l_B = l_N * \frac{5}{2} * \pi \quad \text{Gl. 4-8}$$

mit: l_B ... Bahnlänge
 l_N ... Schweißnahtlänge

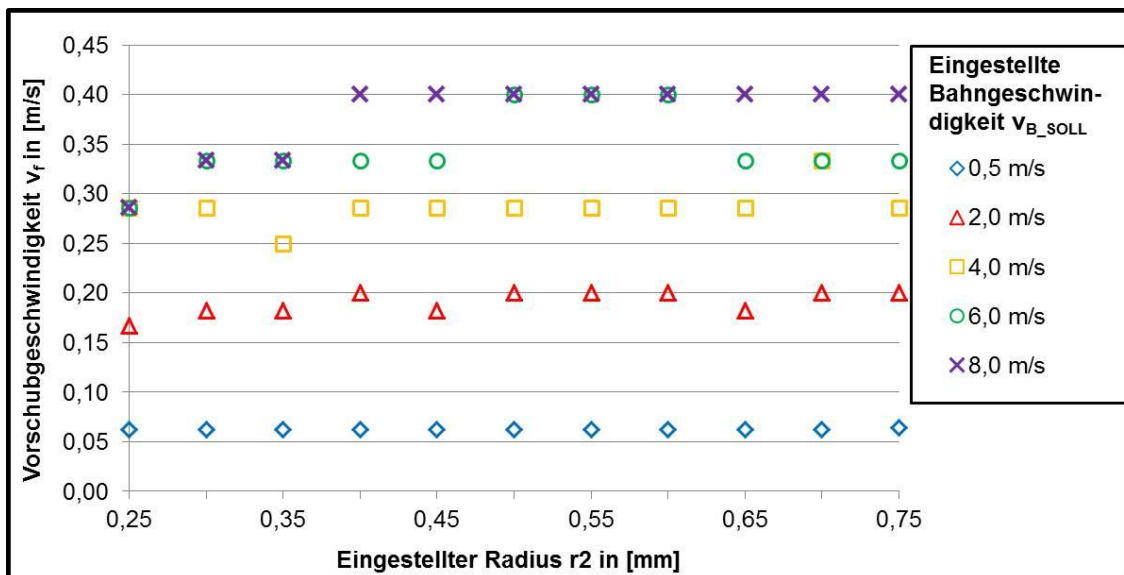


Abbildung 18: Darstellung der resultierenden Vorschubgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Wobbelradius und eingestellter Bahngeschwindigkeit nach Korrektur der Eingabeparameter

4.1.4.3 Ermittlung der Wobelfrequenz

Um die Wobelfrequenz ermitteln zu können, wurden die gemessenen geometrischen Ist-Werte für die Radien r_1 und r_2 verwendet. In der programmierten Konturform wird jedem r_2 -Radius ein r_1 -Radius zugeordnet. Über die Wobbelmenge und die aufgenommenen Bearbeitungszeiten konnte nun über (Gl. 4-9) eine Aussage über die erreichbare Wobelfrequenz getroffen werden. Für die Untersuchungen bzw. die Zeitaufnahmen wurde stets mit einer Nahtlänge von $l_N = 50$ mm gearbeitet.

$$v_W = \frac{M_W}{t}$$

Gl. 4-9

mit: M_W ... großer Wobbelradius
 t ... kleiner Wobbelradius

Wie in der Abbildung 19 zu erkennen ist, wurden Wobelfrequenzen von 80 – 1000 Hz erreicht. Hierbei zeichnet sich die zu erwartende Aussage ab, dass es mit vergrößerten Konturen bzw. Wobbelradien zu einem Abfall der Wobelfrequenz kommt. Auf Grund der bereits in Abschnitt 4.1.2 dargelegten Eigenschaft des Scanners, mit erhöhten Wobbelradien eine schnellere Bahngeschwindigkeit zu fahren, bildet sich hierbei ein leicht degressiver Verlauf heraus. Dies beruht

auf dem gegensätzlichen Einfluss von sinkender Wobbelmenge zu steigender Bahngeschwindigkeit.

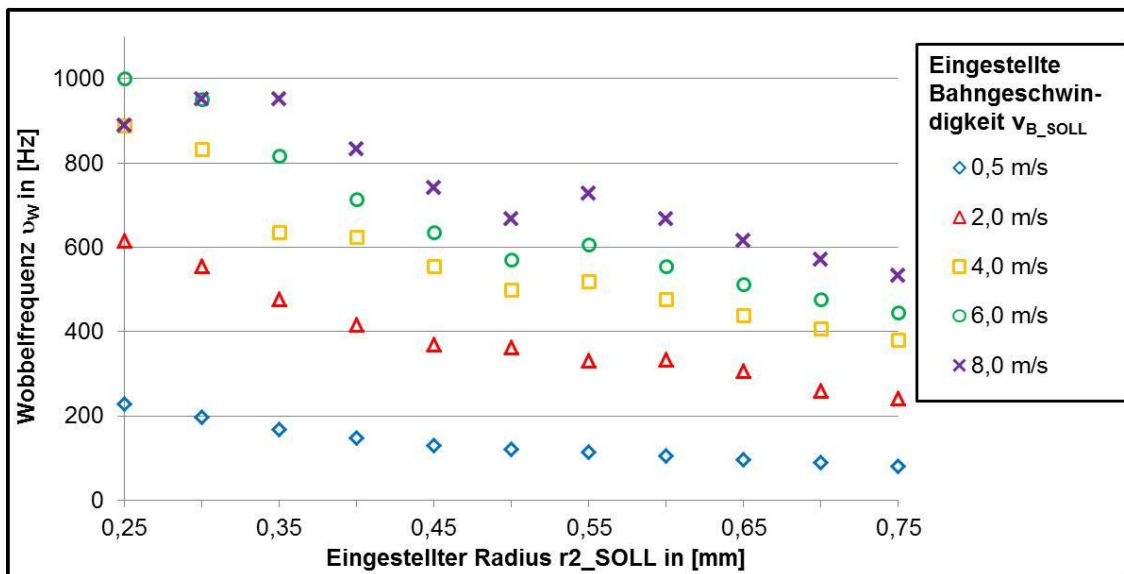


Abbildung 19: Resultierende Wobelfrequenz bei unterschiedlichen Bahngeschwindigkeiten und Wobbelradien

Wird der berechneten Wobelfrequenz die gemessene Vorschubgeschwindigkeit gegenübergestellt, bildet sich wie in Abbildung 20 zu erkennen ist, ein Bereich aus, der die Gesamtheit der erreichten Frequenzen und Geschwindigkeiten widerspiegelt (Bereich 2). Bereich 1 stellt hierbei die Begrenzung hinsichtlich der maximalen untersuchten Konturgrößen von bis zu $r_2 = 0,75$ mm dar, was an den geringen Frequenzen zu erkennen ist. Bereich 3 stellt wiederum die Begrenzung hinsichtlich der minimalen untersuchten Konturgrößen ab $r_2 = 0,25$ mm dar. Es ist zu erkennen, dass höhere Vorschubgeschwindigkeiten bei geringen Wobelfrequenzen erreicht wurden.

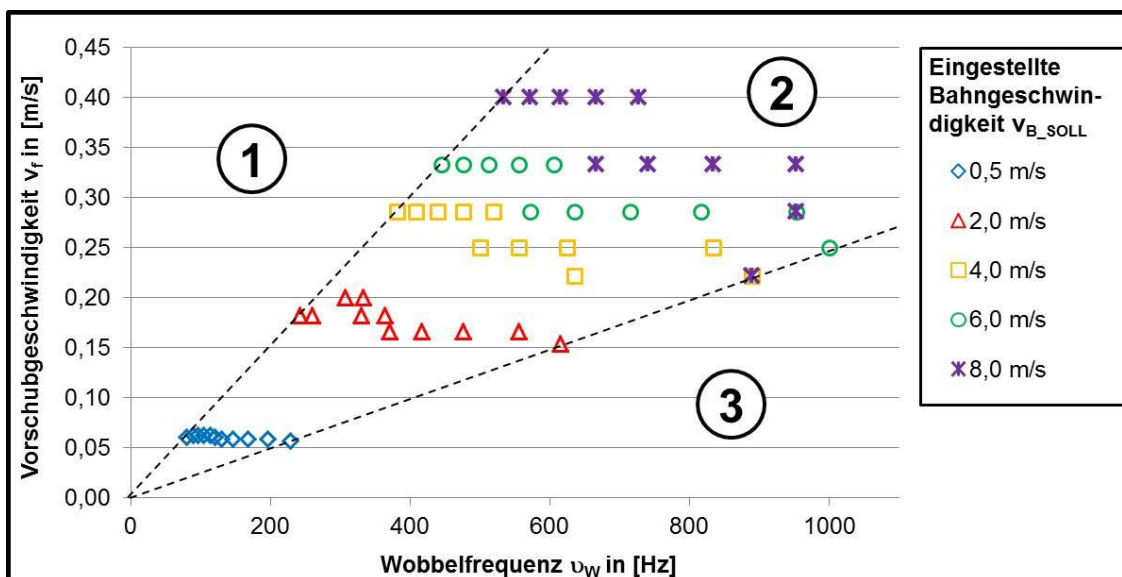


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Wobelfrequenz in Abhängigkeit von der eingestellten Bahngeschwindigkeit

4.2 Untersuchungen zu pendelnder Strahlführung

4.2.1 Erläuterung der Konturform

Das Schweißen erfolgt, wie in Abbildung 21 dargestellt, mittels einer zickzackförmigen oder auch pendelnden Nahterzeugung. Der Galvanometerscanner hat hierbei sowohl die Auslenkbewegung in Y-Richtung als auch die Vorschubbewegung in X-Richtung durchzuführen. Aus diesem Grund ist es notwendig sowohl die resultierende lineare Vorschubgeschwindigkeit v_f als auch die Bahngeschwindigkeit v_B zu betrachten.

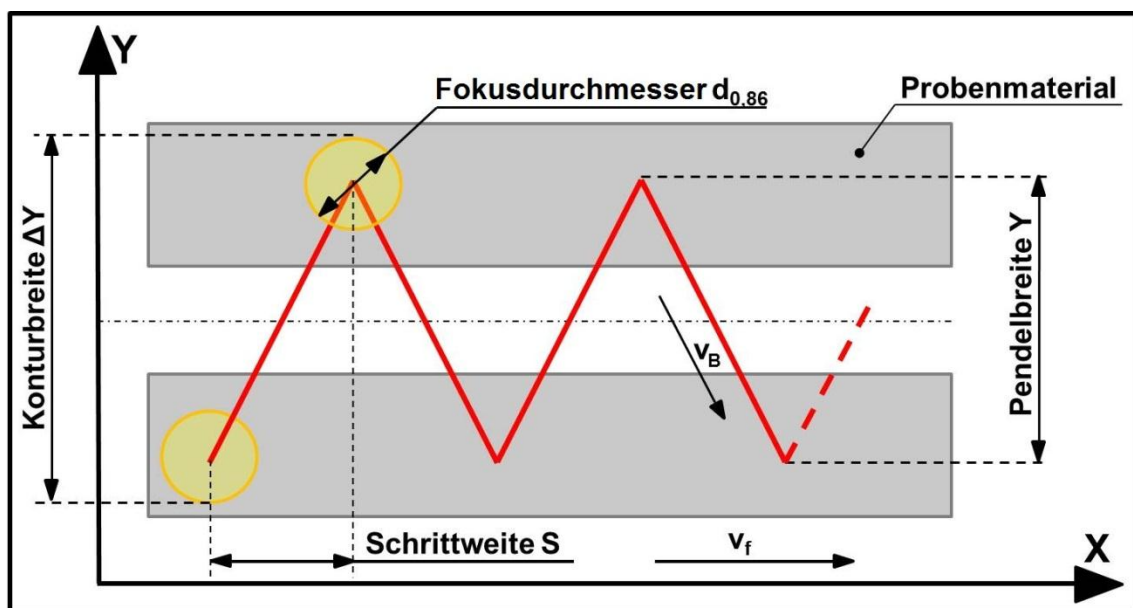


Abbildung 21: Schematische Darstellung der Pendelkontur

Wie ebenfalls der Abbildung 21 zu entnehmen ist, stellt der Y-Wert die untersuchten Pendelbreiten bzw. Strahlauslenkungen von $Y = 0,10, 0,15, 0,20$ und $0,25$ mm dar. Die Einstellung der linearen Vorschubgeschwindigkeit v_f erfolgte über die Variation der Schrittweite S . Eine vollständige Pendelbewegung besteht aus einer Strahlauslenkung in Y-Richtung sowie der Umkehrbewegung in Ausgangslage.

4.2.2 Überprüfung der Konturtreue

Es hat sich bereits bei den Untersuchungen zum Wobbelschweißen in Abschnitt 4.1.2 herausgestellt, dass der verwendete Galvanometerscanner bei geringen Konturgrößen zu Abweichungen hinsichtlich der Konturform neigt. Aus diesem Grund wurden Testschweißungen bei einer geringen applizierten Leistung von $P = 300 \text{ W}$ durchgeführt um die Einhaltung der eingestellten Werte zu kontrollieren. Beobachtet wurde hierbei, ob die geforderten Konturbreiten (eingestellte Strahlauslenkung + Fokusbereich) bei Vergrößerung der Schrittweite eingehalten werden.

Zwei Aussagen können anhand der Abbildung 22 getroffen werden. Zunächst, dass die Konturen mit einer Strahlauslenkung bzw. Amplitude von 0,20 mm und 0,25 mm bereits bei geringen Schrittweiten nicht die geforderten Konturbreiten erzeugen. Weiterhin, dass eine Erhöhung des X-Wertes und somit der linearen Vorschubgeschwindigkeit, zu einem degressiven Abfall der Konturbreite führte. Wie der Abbildung 22 zu entnehmen ist, wurde trotz gleichbleibend eingestellter Auslenkung bei erhöhter Schrittweite nur noch eine Konturbreite erreicht, die dem Fokusbereich entspricht. Das bedeutet, dass die Konturbreite mit Erhöhung der linearen Vorschubgeschwindigkeit nachlässt und ab einem Zeitpunkt gar keine Auslenkung mehr erfolgt.

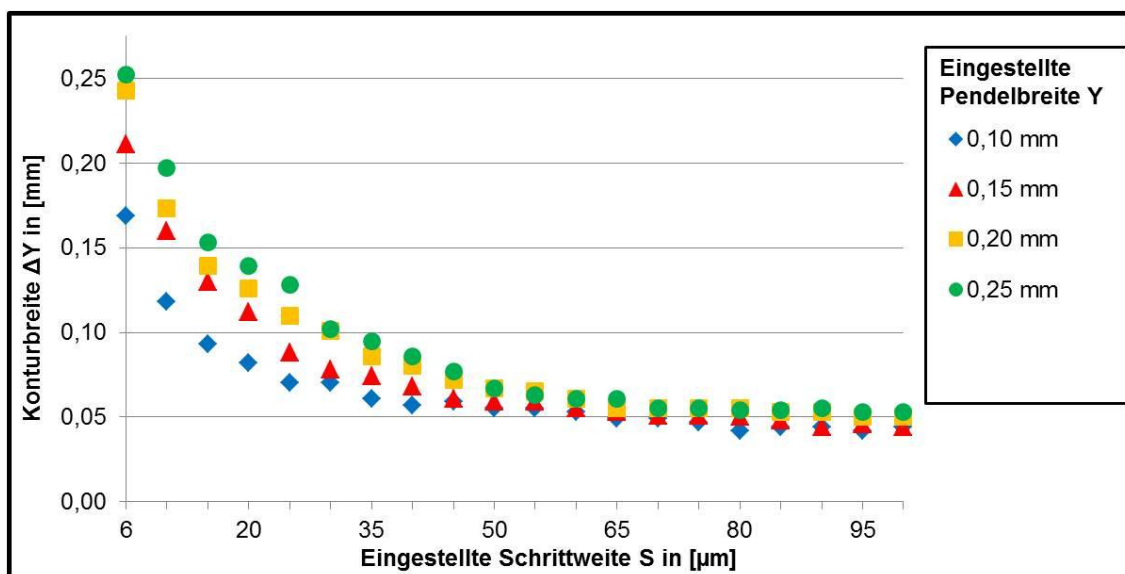


Abbildung 22: Änderung der Konturbreite in Abhängigkeit von Pendelbreite und Schrittweite

Die Ursache für diese Problematik ist hierbei eine Fehleinstellung der im Steuerprogramm LasPaint verwendeten Delay-Befehle. Bei diesen Scanner-Delays handelt es sich um Wartezeiten zwischen einzelnen zu erzeugenden Vektoren, Konturen oder Richtungs- Positions- und Geschwindigkeitsänderungen. Auf Grund einer zeitlichen Differenz zwischen eingestellter und realer Laserbewegung, beispielsweise durch mechanische Trägheit der Scannerkomponenten, kann es bei Fehleinstellung zu Verschleppungen in der Konturgenauigkeit kommen [22].

4.2.3 Unterbinden der Konturabweichung

Um der Verringerung an Konturbreite entgegenzuwirken war es notwendig eine Anpassung der vom Steuerprogramm LasPaint verwendeten Delay-Werte, an die eingestellte Pendelbreite, vorzunehmen. Der hierfür ausschlaggebende Parameter ist der sogenannte Polygon-Delay. Bei diesem handelt es sich um eine eingestellte Wartezeit zwischen zwei nacheinander erzeugten Vektoren. Der folgenden Tabelle sind die ermittelten Werte für den Polygon-Delay zu entnehmen, bei denen die erzeugten Pendelbreiten auch bei erhöhten Schrittweiten bzw. erhöhter linearer Vorschubgeschwindigkeit, dem eingestellten Wert entsprechen.

Tabelle 9: Ermittelte Polygon-Delay-Werte zur Vermeidung der Konturabweichung

Pendelbreite Y in [mm]	Polygon-Delay in [ns]
0,10	245
0,15	235
0,20	225
0,25	215

4.2.4 Ermittlung erreichbarer Geschwindigkeiten und Frequenzen

Es hat sich in den vorangegangenen Analysen gezeigt, dass der verwendete Galvanometerscanner bei Erzeugung geringer Konturgrößen, in den erreichbaren Geschwindigkeiten begrenzt ist. Aus diesem Grund werden zunächst die maximal erreichbaren Bahn- und Vorschubgeschwindigkeiten ermittelt. Hierzu wurden, unter Verwendung eines Oszilloskops Zeitaufnahmen für jede der vier untersuchten Konturbreiten durchgeführt. Die Schrittweiten variierten hierbei zwischen 5 µm und maximal 225 µm.

Sämtliche ermittelte Geschwindigkeiten und Frequenzen können den Geschwindigkeitstabellen in Anlage F entnommen werden.

4.2.4.1 Bahngeschwindigkeit

Die Bahngeschwindigkeit v_B wird nach (Gl. 4-10) berechnet aus der Division der Bahnlänge durch die gemessene Bearbeitungszeit.

$$v_B = \frac{l_B}{t} \quad \text{Gl. 4-10}$$

mit: v_B ... Bahngeschwindigkeit
 l_B ... Bahnlänge
 t ... gemessene Bearbeitungszeit

Um die Bahnlänge zu berechnen wird nach (Gl. 4-11) die Hypotenuse aus der Schrittweite S und der Pendelbreite Y mit der Menge an Strahlauslenkungen multipliziert, die während des Schweißprozesses erfolgen.

$$l_B = \left(\frac{l_N}{S}\right) * \sqrt{(Y^2 + S^2)} \quad \text{Gl. 4-11}$$

mit l_B ... Bahnlänge
 l_N ... Schweißnahtlänge
 S ... Schrittweite
 Y ... Pendelbreite

Die Menge an Pendelbewegungen während des Schweißprozesses wird nach (Gl. 4-12) berechnet. Da eine vollständige Pendelbewegung aus einer Auslenkbewegung des Laserstrahls und der Umkehrbewegung in Ausgangslage besteht, muss die Nahtlänge durch das Doppelte der Schrittweite dividiert werden.

$$M_P = \frac{l_N}{2 * S} \quad \text{Gl. 4-12}$$

mit: M_P ... Menge an Pendelbewegungen
 l_N ... Schweißnahtlänge
 S ... Schrittweite

Durch Division der Menge an Pendelbewegungen durch die gemessene Bearbeitungszeit kann nach (Gl. 4-13) die Pendelfrequenz berechnet.

$$\nu_P = \frac{M_P}{t} \quad \text{Gl. 4-13}$$

mit: ν_P ... Pendelfrequenz
 M_P ... Menge an Pendelbewegungen
 t ... Bearbeitungszeit

Wie bereits in den Untersuchungen zum Wobbelschweißen (siehe Abschnitt 4.1) ermittelt wurde, kann der Scanner nicht effektiv auf die häufigen Umlenkbewegungen reagieren. Aus diesem Grund gibt es eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen der eingegebenen Soll-Bahngeschwindigkeit und der resultierenden Bahngeschwindigkeit. Um das Verhalten des Scanners bei steigender Bahngeschwindigkeit darzustellen wurden die Soll-Bahngeschwindigkeiten $v_{B_SOLL} = 0,8 \text{ m/s}$, $1,8 \text{ m/s}$ und $8,0 \text{ m/s}$ gegenübergestellt. Die Messungen sind in Abbildung 23 dargestellt.

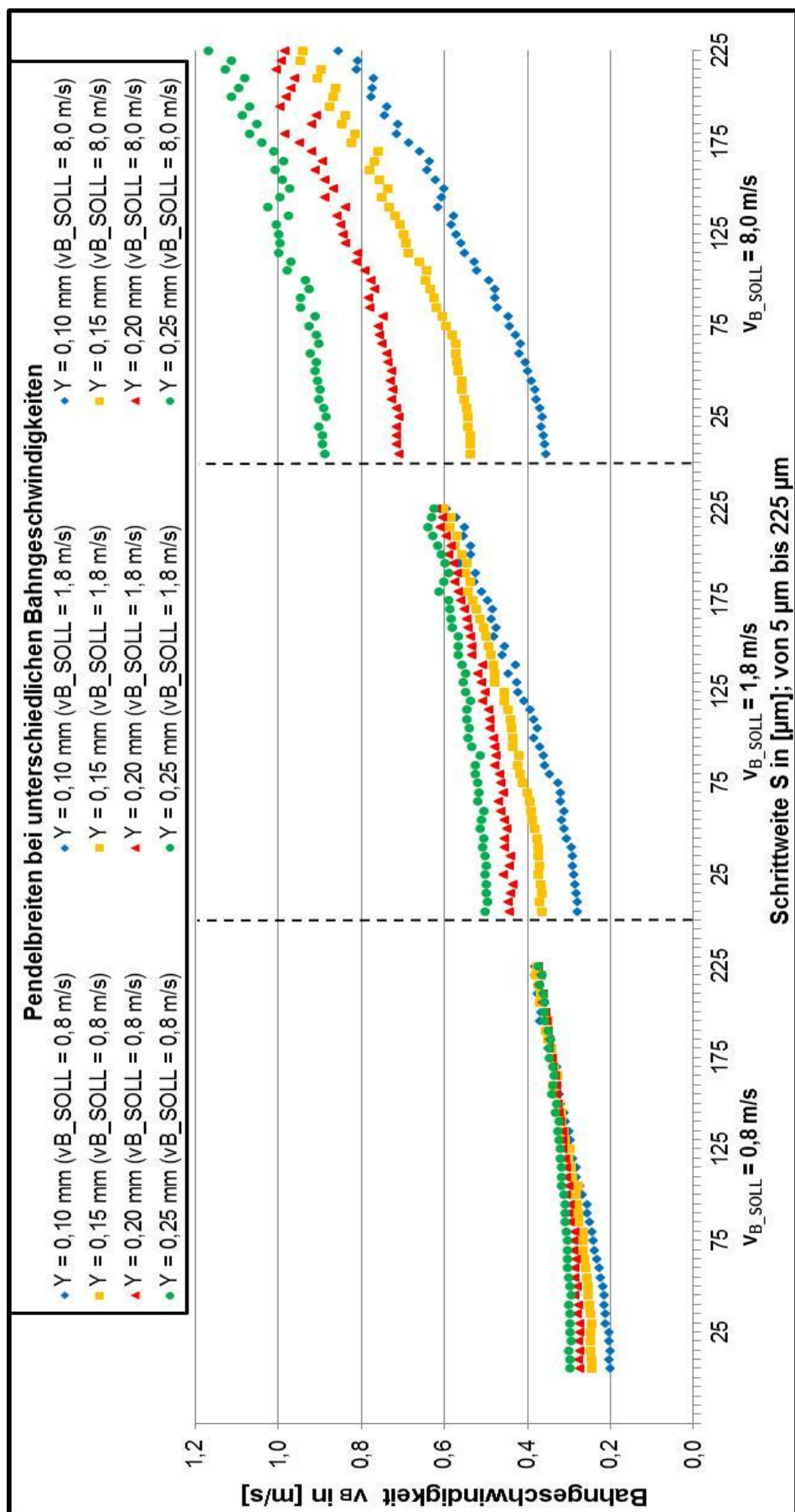


Abbildung 23: Erreichbare Bahngeschwindigkeit bei unterschiedlichen Pendelbreiten

Tabelle 10: Zusammenstellung der erreichten Bahngeschwindigkeiten bei pendelnder Strahlführung

Eingestellte Bahngeschwindigkeit v_{B_SOLL} (Soll-Wert)	Pendelbreite	Erreichte Bahngeschwindigkeit v_B (Ist-Wert)	Erreichte Bahngeschwindigkeit v_B (Ist-Wert)
0,8 m/s	Y = 0,10 mm	0,38 m/s	47,5 %
	Y = 0,15 mm	0,38 m/s	47,5 %
	Y = 0,20 mm	0,37 m/s	46,3 %
	Y = 0,25 mm	0,37 m/s	46,3 %
1,8 m/s	Y = 0,10 mm	0,59 m/s	32,8 %
	Y = 0,15 mm	0,60 m/s	33,3 %
	Y = 0,20 mm	0,62 m/s	34,4 %
	Y = 0,25 mm	0,62 m/s	34,4 %
8,0 m/s	Y = 0,10 mm	0,85 m/s	10,6 %
	Y = 0,15 mm	0,94 m/s	11,8 %
	Y = 0,20 mm	0,98 m/s	12,3 %
	Y = 0,25 mm	1,12 m/s	14,0 %

Sowohl der Abbildung 23 als auch der Tabelle 10 sind verschiedene Aussagen zu entnehmen. Zunächst, dass der Scanner keine der geforderten Bahngeschwindigkeiten erreicht hat. Des Weiteren, dass mit Erhöhung der Bahngeschwindigkeit ebenfalls die prozentualen Abweichungen vom Soll ansteigen. Die Berechnungen zeigen, dass der Galvanometerscanner bei einer eingestellten Bahngeschwindigkeit von $v_{B_SOLL} = 8,0$ m/s, mit einer Abweichung vom Sollwert von bis zu 86 %, ganz erhebliche Probleme mit dem Schweißen von geometrisch bestimmten Konturformen, respektive der pendelnden Konturform aufweist. Überdies beträgt die Bahngeschwindigkeit bei einer Pendelbreite von $Y = 0,25$ mm lediglich 2,6 % der maximal möglichen geradlinigen Verfahrbewegung nach [10], wie sie bereits in Abschnitt 3.1.1 dargelegt wurde.

Der zunehmende Abstand zwischen den jeweils vier Graphen ergibt sich durch die scannereigene Reaktion auf unterschiedliche Konturgrößen. Bei erhöhter Bahngeschwindigkeit wirkt sich dieser Effekt wesentlich gravierender aus. Das nach rechts ansteigende Verhalten erklärt sich durch die Vergrößerung der Schrittweite zur Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit. Geometrisch betrachtet ist dies ebenfalls eine Konturvergrößerung, auf die der Scanner mit erhöhter Bahngeschwindigkeit reagiert.

4.2.4.2 Lineare Vorschubgeschwindigkeit

Bei der Vorschubgeschwindigkeit wirken sich direkt die Abweichungen aus, die bei der Ermittlung der Bahngeschwindigkeit benannt wurden. Obwohl es mit Erhöhung der eingestellten Bahngeschwindigkeit zu einer erhöhten linearen Vorschubgeschwindigkeit kommt, gleichen sich die vier Graphen immer mehr an. Dies wird in Abbildung 24 dargestellt. Schweißungen mit kleineren Konturbreiten weisen im Normalfall auf Grund geringerer Bahnlänge höhere Vorschubgeschwindigkeiten auf.

Auf Grund der sich verstärkenden Abweichungen von der eingestellten Bahngeschwindigkeit wird die Vorschubgeschwindigkeit jedoch bei kleinen Konturbreiten mehr begrenzt als bei Größeren. Dies führt, wie in Abbildung 24 (rechts: $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$) zu sehen ist, zu einer annähernd einheitlichen Vorschubgeschwindigkeit, trotz unterschiedlicher Bahnlängen. Dies belegt, dass bei maximal eingestellter Bahngeschwindigkeit die Pendelbreite keinen oder einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit ausübt.

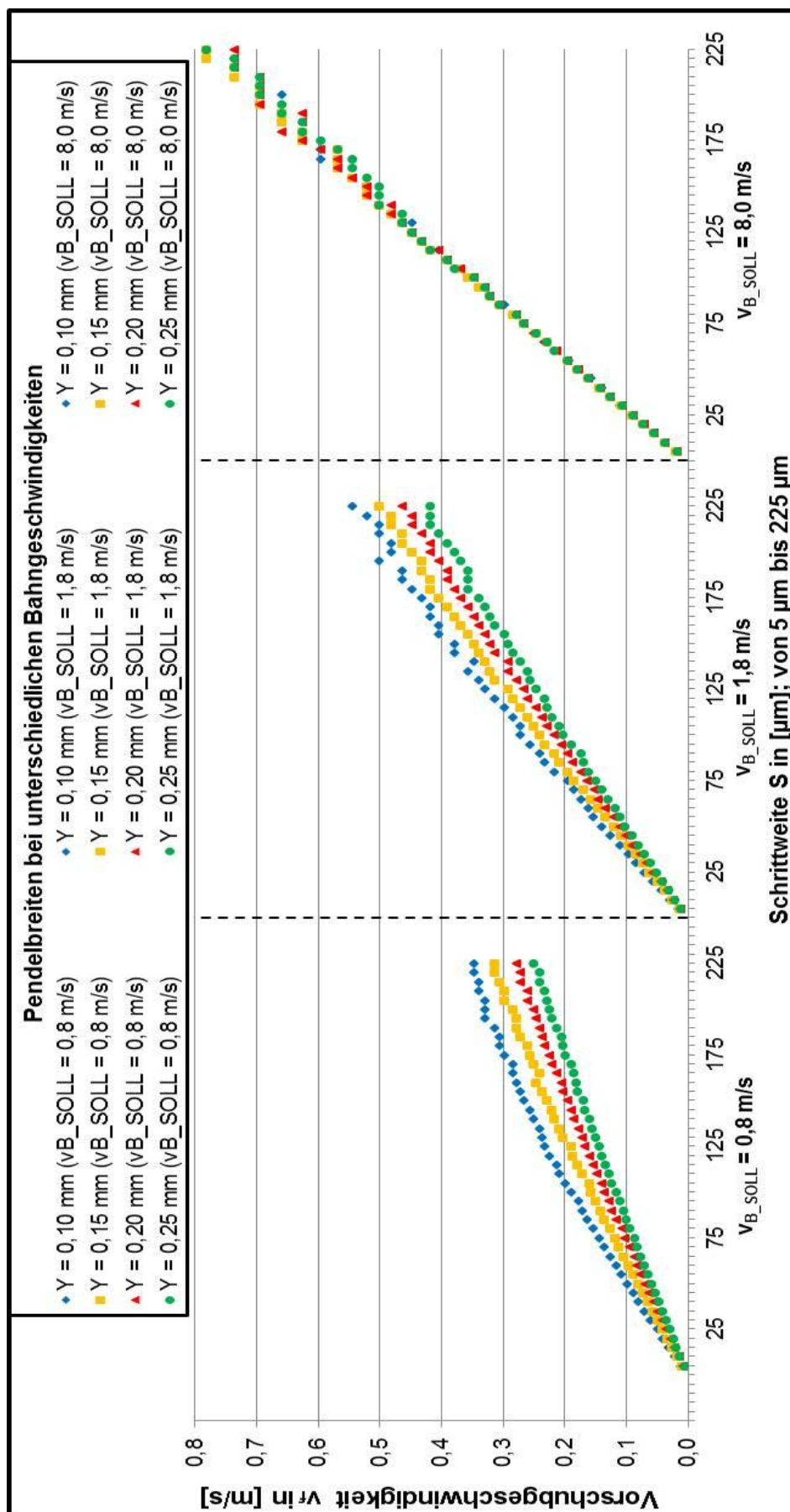


Abbildung 24: Erreichbare Vorschubgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Pendelbreiten

4.2.4.3 Ermittlung der Pendelfrequenz

Die berechneten Pendelfrequenzen ergaben bei jeder Pendelbreite und Schrittweite einen Wert zwischen $v_P = 1653 \text{ s}^{-1}$ und $v_P = 1844 \text{ s}^{-1}$. Da die Versuche mit einer eingestellten Soll-Bahngeschwindigkeit von $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$ an der Grenze der Leistungsfähigkeit des Galvanometerscanners ablaufen, ergibt sich ein ähnlicher Effekt wie bei der Vorschubgeschwindigkeit (siehe Abschnitt 4.2.3.2). Durch die Wechselwirkung zwischen Konturgröße und Schreibgeschwindigkeit des Scanners kommt es dauerhaft zur maximal erreichbaren Pendelfrequenz. Berechnet wird die Pendelfrequenz über (Gl. 4-14).

$$v_P = \frac{\left(\frac{l_N}{2 * S}\right)}{t} \quad \text{Gl. 4-14}$$

mit: l_N ... Schweißnahtlänge
 S ... Schrittweite
 t ... Bearbeitungszeit

Sämtliche ermittelte Pendelfrequenzen können der Geschwindigkeitstabelle in Anlage G entnommen werden.

4.3 Schweißen mit pendelnder Strahlführung

4.3.1 Festlegen einer Einteilung zwischen bedingte und volle Durchschweißung

Um eine reproduzierbare Aussage über die Schweißnähte treffen zu können, wurde eine strikte Begrenzung zwischen den Angaben bedingte und volle Durchschweißung etabliert. Unter bedingte Durchschweißung zählen die Schweißnähte, bei denen sich zwar eine Wurzel ausbildet, aber keine geschlossene Kontur zu erkennen ist. In Abbildung 25 ein Beispiel zu dieser Einteilung dargestellt. Die geometrischen Parameter dieser Kontur sind wie hierbei zu erkennen ist, sind die Umkehrpunkte wesentlich stärker ausgeprägt als die verbindenden geradlinigen Schweißungen. Dies erklärt sich durch die, anhand des Polygon-Delays eingebrachte Wartezeit bei der Laserbewegung, auf die in Abschnitt 4.2.3 eingegangen wurde. Auf Grund der klar unterbrochenen Kontur, wurde diese Schweißnaht als bedingt Durchgeschweißt deklariert.

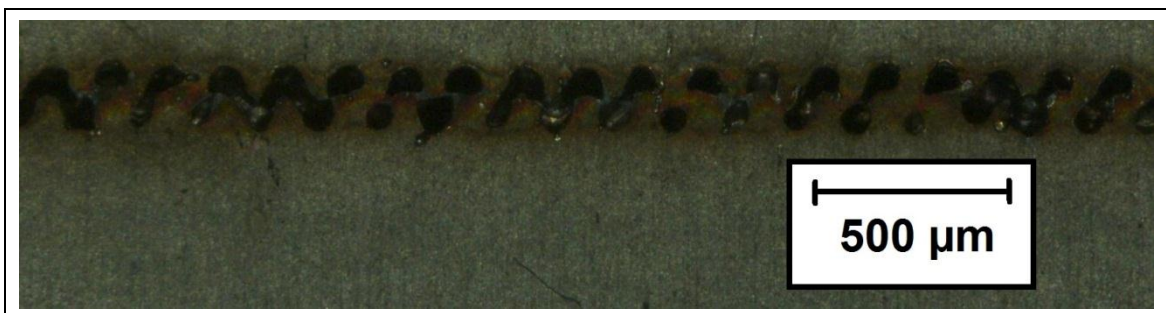


Abbildung 25: Beispiel einer bedingt durchgeschweißten Pendelkontur; Blindnaht

Konturparameter: $Y = 0,15 \text{ mm}$; $S = 0,115 \text{ mm}$

In der folgenden Abbildung ist die Wurzel einer Schweißnaht zu erkennen, die als voll durchgeschweißt anzusehen ist. Die zickzackförmige Wurzel ist stark ausgeprägt und bildet eine durchgehende Kontur ohne Lücken.



Abbildung 26: Beispiel einer voll durchgeschweißten Pendelkontur; Blindnaht

Konturparameter: $Y = 0,10 \text{ mm}$; $S = 0,170 \text{ mm}$

Da sich bei den Stumpfstoßschweißungen keine zickzackförmige Wurzel wie bei Blindnähten darstellt, wurde die Unterteilung zwischen bedingt und voll durchgeschweißt anhand der sichtbaren wurzelseitigen Aufschweißung getroffen. Die Schweißnaht, die in der folgenden Abbildung 27 dargestellt ist, wurde als bedingt Durchgeschweißt deklariert. Obwohl angeschmolzene Körperkanten zu erkennen sind, fehlt es an jedwedem verbindenden Schweißgut.



Abbildung 27: Beispiel einer bedingt durchgeschweißten Pendelkontur; Stumpfnaht

Konturparameter: $Y = 0,15 \text{ mm}$; $S = 0,110 \text{ mm}$

Obwohl von vereinzelt auftretendem Wurzelrückfall begleitet, wird die Schweißnaht in Abbildung 28 als voll durchgeschweißt angesehen. Die Körperkanten sind vollständig aufgeschmolzen und das Schweißgut ist sichtbar. Bei genauer Betrachtung sind zudem die Durchschweißungen der Umkehrpunkte an den Nahtflanken zu erkennen.



Abbildung 28: Beispiel einer voll durchgeschweißten Pendelkontur; Stumpfnah

Konturparameter: $Y = 0,15 \text{ mm}$; $S = 0,120 \text{ mm}$

4.3.2 Ermittlung der Durchschweißgeschwindigkeit und Festlegung der Schweißparameter

X5CrNi18-10

Wie der Abbildung 29 zu entnehmen ist, steigt die Durchschweißgeschwindigkeit bei geringerer Materialstärke, sowohl mit wie auch ohne den Einsatz einer Cross-Düse. Ebenso ermöglichen größere Pendelbreiten eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeiten, bei denen eine vollständige Durchschweißung zu erkennen ist. Die Verwendung der Cross-Düse, zur Beseitigung der Dampf-Plasma-Fackel, erbringt ebenfalls eine Steigerung der möglichen Durchschweißgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitssteigerung variiert zwischen 4 und 30 %. Am deutlichsten lässt sich die Geschwindigkeitssteigerung mit bis zu 30 % bei einer Materialstärke von 1,0 mm erkennen. Bei einer Materialstärke von 2,0 mm ist die Geschwindigkeitssteigerung mit bis zu 4 % als verschwindend gering anzusehen.

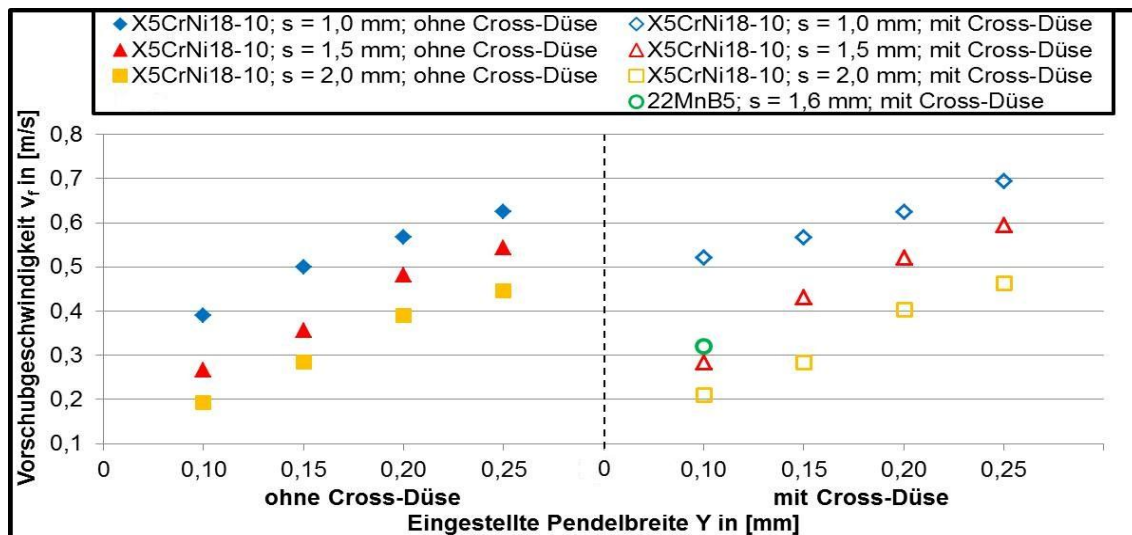


Abbildung 29: Vergleich der maximalen Vorschubgeschwindigkeiten mit und ohne Einsatz der Cross-Düse, bei der eine volle Durchschweißung erreicht wurde

Mit der Zielstellung bei möglichst hohen Vorschubgeschwindigkeiten eine verbesserte Spaltüberbrückbarkeit zu gewährleisten wäre es von Vorteil Schweißnähte mit möglichst großer Pendelbreite zu erzeugen. Jedoch zeigte sich bei Vergleich der Testschweißungen, dass es ab einer Pendelbreite von $Y = 0,20$ mm zum Auftreten von Schweißspritzern und vereinzelt auftretenden Unregelmäßigkeiten kommt. Dieser Effekt wird dem Aufweiten des Temperaturfeldes zugeordnet. Aus diesem Grund wurden für die Schweißnähte, welche im Folgenden nach DIN EN ISO 13919-1 bewertet werden sollen, folgende Parameter angewendet:

Tabelle 11: Zusammenstellung der Prozessparameter für die Versuchsschweißungen am Werkstoff X5CrNi18-10

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Materialstärke = 2,0 mm			
applizierte Laserstrahlleistung	P	2737,5	W
Pendelbreite	Y	0,15	mm
Schrittweite	S	0,080	mm
Poly-Delay	-	235	μ s
Cross-Düse	ja		
Vorschubgeschwindigkeit ²	v_f	0,29	m/s

² Bei der Vorschubgeschwindigkeit handelt es sich um einen resultierenden Wert, der sich nach gewählter Pendelbreite und Schrittweite ergibt. Sämtliche ermittelte Vorschubgeschwindigkeiten können der Geschwindigkeitentabelle in Anlage G entnommen werden.

Materialstärke = 1,5 mm			
applizierte Laserstrahlleistung	P	2737,5	W
Pendelbreite	Y	0,15	mm
Schrittweite	S	0,120	mm
Poly-Delay	-	235	µs
Cross-Düse	ja		
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	0,43	m/s
Materialstärke = 1,0 mm			
applizierte Laserstrahlleistung	P	2737,5	W
Pendelbreite	Y	0,15	mm
Schrittweite	S	0,170	mm
Poly-Delay	-	235	µs
Cross-Düse	ja		
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	0,57	m/s

Wie anhand der Tabelle 11 zu erkennen ist, wird bei unterschiedlicher Materialstärke lediglich die Schrittweite variiert, wodurch die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst wird.

22MnB5

Vergleichbar mit den Untersuchungen am X5CrNi18-10 wurden zunächst grundlegende Untersuchungen mit Blindschweißversuchen am 22MnB5 durchgeführt, um die Durchschweißgeschwindigkeit und das allgemeine Verhalten des Werkstoffes bei pendelnder Schweißbearbeitung zu ermitteln. Hierbei zeigte sich zunächst, dass es bei diesem Material vermehrt zu Spritzer- und Funkenbildung kommt. Überdies weisen die Schweißstellen Verfärbungen und Ruß-Rückstände auf, die auf verbrannte Legierungsbestandteile hinweisen.

Gegenüber dem X5CrNi18-10 war es bei Pendelschweißen des 22MnB5 notwendig eine höhere Intensität an der Schweißposition einzubringen. Dies zeigte sich an zwei Umständen, die sich für das Schweißen dieses Materials als charakteristisch herausstellten. Zunächst war es nicht möglich, wie beim X5CrNi18-10 die Pendelbreite zu variieren, bzw. für eine bessere Spaltüberbrückung, eine

größere Pendelbreite zu wählen. Lediglich die kleinste untersuchte Pendelbreite von 0,10 mm führte bei Stumpfstoßschweißungen zu den geforderten Naht Eigenschaften wie einer vollen Durchschweißung oder dem lückenlosen Verbund der zwei Probenbleche.

Bereits bei einer Erhöhung der Pendelbreite auf 0,15 mm kommt es zu vereinzelten Lücken in der Schweißnaht und fehlender Durchschweißung. Weiterhin traten, neben einem allgemein schlechten Erscheinungsbild der Naht vermehrt Spritzer auf. Dies weist auf ein verstärkt unregelmäßiges Schmelzbad hin. Überdies ist der Einsatz der Cross-Düse beim Pendelschweißen von 22MnB5 zwingend erforderlich. Dies wird in der vergleichenden Darstellung in Abbildung 30 deutlich.

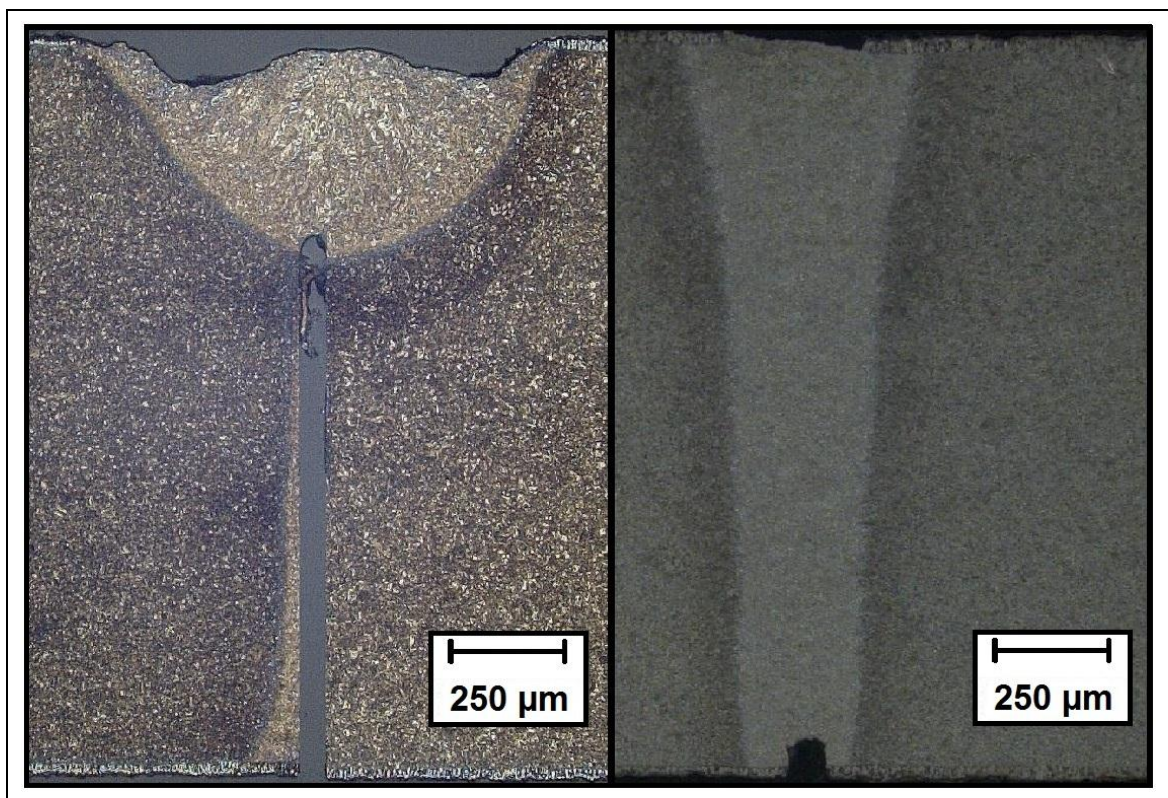


Abbildung 30: Gegenüberstellung des Pendelschweißens am 22MnB5 mit und ohne den Einsatz der Cross-Düse

Hierbei handelt es sich um Schweißungen mit übereinstimmenden Parametern, bis auf den Einsatz der Cross-Düse. Wie in der Abbildung deutlich zu erkennen ist, war eine vollständige Einschweißung ohne den Einsatz der Cross-Düse nicht möglich. Dies wird auf das Ausgasen der Zinkschicht während des Schweißprozesses zurückgeführt [2]. Aus diesen Gründen konnte für den

22MnB5 lediglich eine maximale Durchschweißgeschwindigkeit von 0,33 m/s bei einer festen Pendelbreite von $Y = 0,10$ mm und dem Einsatz der Cross-Düse ermittelt werden. Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen wurden zur Erzeugung der Schweißnähte, die für weitere Schweißnahtbewertungen verwendet werden, folgende Parameter gewählt:

Tabelle 12: Zusammenstellung der Prozessparameter für die Versuchsschweißungen am Werkstoff 22MnB5

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Materialstärke = 1,6 mm			
applizierte. Laserstrahlleistung	P	2737,5	W
Pendelbreite	Y	0,10	mm
Schrittweite	S	0,090	mm
Poly-Delay	-	225	μ s
Cross-Düse	ja		
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	0,33	m/s

Die gewählten Parameter für die Schweißnähte, die in den folgenden Kapiteln näher betrachtet werden sollen sind in der Geschwindigkeitentabelle in Anlage G farblich markiert. Blau = X5CrNi18-10, Braun = 22MnB5

Vergleich der Durchschweißgeschwindigkeiten

Anhand der ermittelten Vorschubgeschwindigkeiten, bei denen sich eine vollständige Durchschweißung ergibt, kann ein Vergleich mit den von Schwind [1] ermittelten Durchschweißgeschwindigkeiten getätigt werden. Wie in der Abbildung 31 zu erkennen ist, konnten bei geradliniger Strahlführung höhere Vorschübe trotz vergleichbarer Parameter und Versuchsaufbau. Die verwendeten Schweißparameter werden in Tabelle 13 aufgeführt.

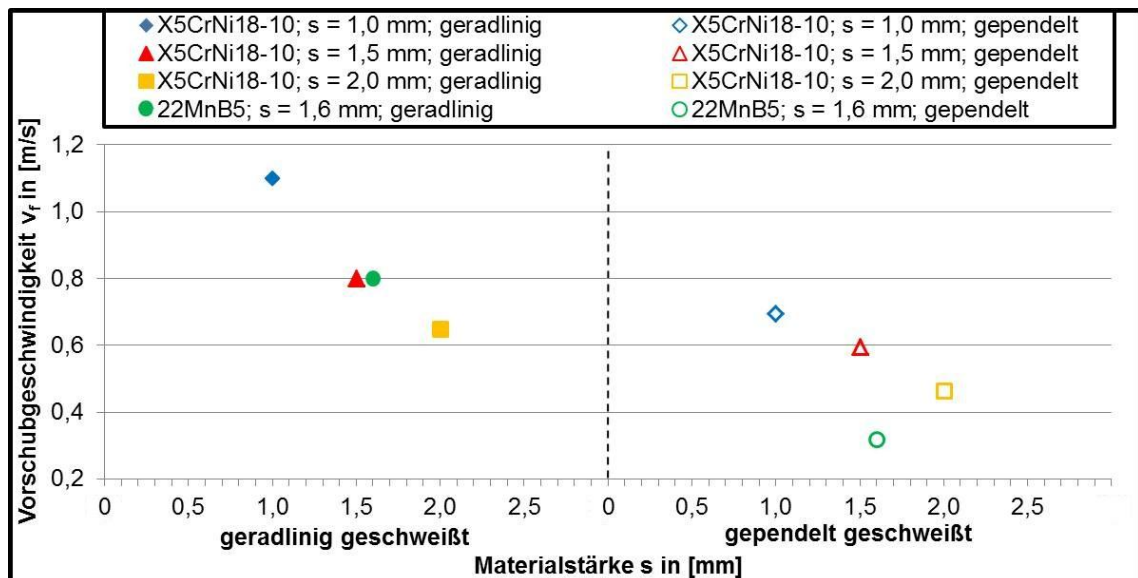


Abbildung 31: Vergleich maximaler Durchschweißgeschwindigkeiten bei geradliniger und gependelter Strahlführung

Tabelle 13: Vergleich der Schweißparameter bei geradliniger und pendelnder Strahlführung

Schweißparameter	Symbol	Geradliniges Schweißen [1]	Pendelndes Schweißen
Applizierte Laserstrahlleistung	P	2760 W	2737,5 W
Fokusbereich	$d_{0,86}$	65 μm	65 μm
Beugungsmaßzahl	M^2	1,55	1,55
Brennweite	f	500 mm	500 mm
Einsatz der Cross-Düse		ja	ja
Strahlführung durch:		Raylase Scanner	Raylase Scanner

5 Charakterisierung der Schweißnähte

5.1 Bewertung der Schweißnähte

5.1.1 Durchführen einer Sichtprüfung

Die Schweißnähte, die mit den in Abschnitt 4.3.2 festgelegten Parametern erzeugt wurden, werden in diesem Abschnitt Anhand einer Sichtprüfung nach DIN EN ISO 17637 [23] bewertet. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich hierbei um eine Beurteilung der Nahtform und -ausprägung handelt. Eine Bewertung zu Nahtunregelmäßigkeiten wird in Abschnitt 5.1.2 nach DIN EN ISO 13919-1 durchgeführt. Eine Säuberung bzw. Nacharbeit der Schweißstellen war lediglich bei dem Material 22MnB5 notwendig, da nach dem Schweißprozess Ruß und Schmauchrückstände von der Schweißnaht zu entfernen waren.

Wie in Abbildung 32 zu erkennen ist, bilden sich beim Pendelschweißen von X5CrNi18-10, bei verschiedenen Materialdicken, unterschiedlich geformte Nahtoberraupen aus. Speziell bei den Materialstärken $s = 1,0 \text{ mm}$ und $s = 1,5 \text{ mm}$ ist die Schweißnahtausprägung durch die pendelnde Laserstrahlführung zu erkennen. Auf Grund unzureichenden Schmelzbades weisen die Nahtoberraupen bei diesen Materialstärken durchweg Nahrückfall auf. Dies ist im Vergleich der Querschliffe in Abbildung 33 zu erkennen. Überdies sind bei allen Schweißnähten Anlaufverfärbungen zu erkennen.

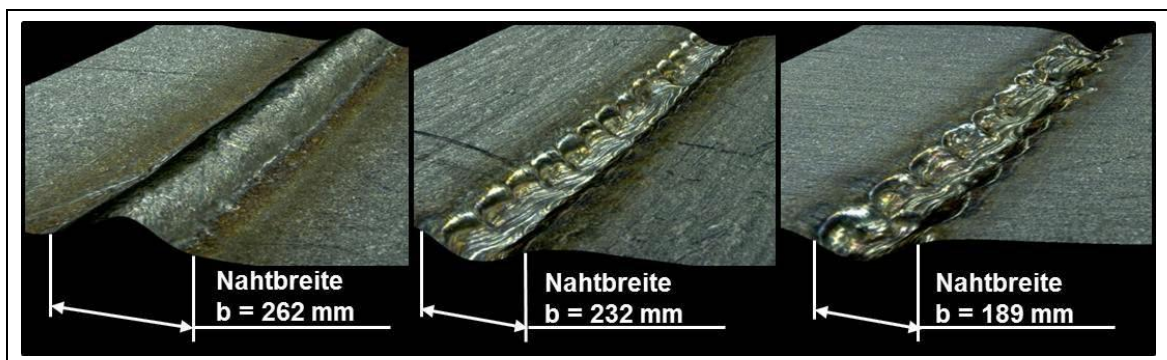


Abbildung 32: Darstellung der Nahtoberraupen am X5CrNi18-10 bei verschiedenen Materialstärken

Probendicken: links: $s = 2,0 \text{ mm}$; mitte: $s = 1,5 \text{ mm}$; rechts: $s = 1,0 \text{ mm}$

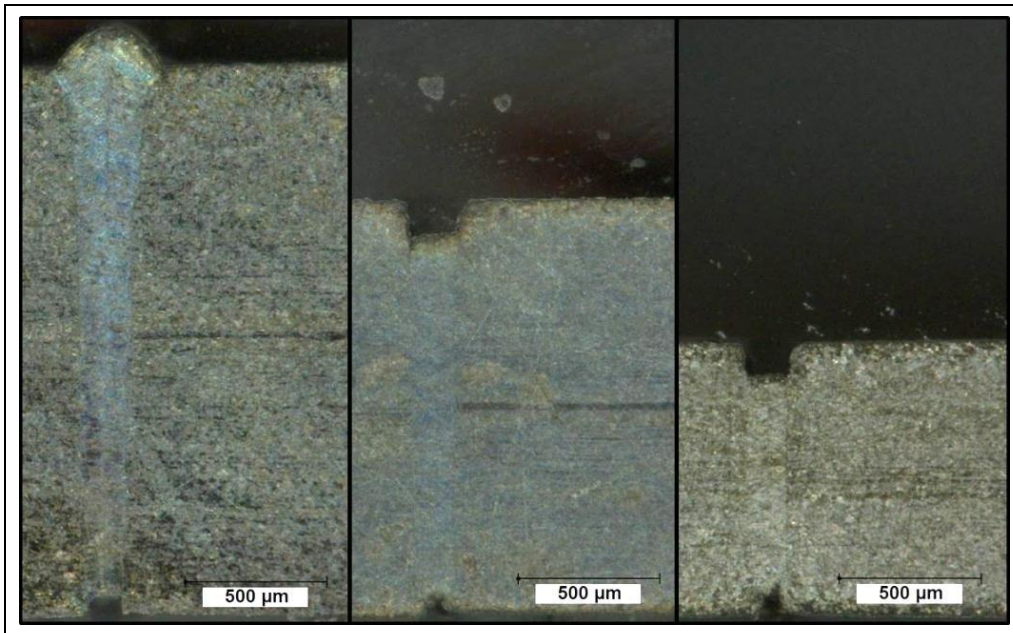


Abbildung 33: Querschliffaufnahmen der Schweißnähte am X5CrNi18-10

Probendicken: links: $s = 2,0 \text{ mm}$; mitte: $s = 1,5 \text{ mm}$; rechts: $s = 1,0 \text{ mm}$

Die Schweißnähte am X5CrNi18-10 zeigen auf der gesamten Nahtlänge ein gleichmäßiges Erscheinungsbild der Raupen mit konstanter Nahtbreite.

Bei dem Material 22MnB5 weisen die Schweißnähte ebenfalls ein gleichmäßiges Erscheinungsbild mit konstanter Nahtbreite auf. Jedoch stellt sich die äußere Form der Nahtoberraupe als stark geschuppt dar, wie in Abbildung 34 zu erkennen ist. Weiterhin sind an den Nahtflanken partiell Einbrände und Randkerben zu erkennen. Wie bei den Schweißnähten aus X5CrNi18-10 trat auch beim 22MnB5 dauerhaft Wurzelrückfall auf.

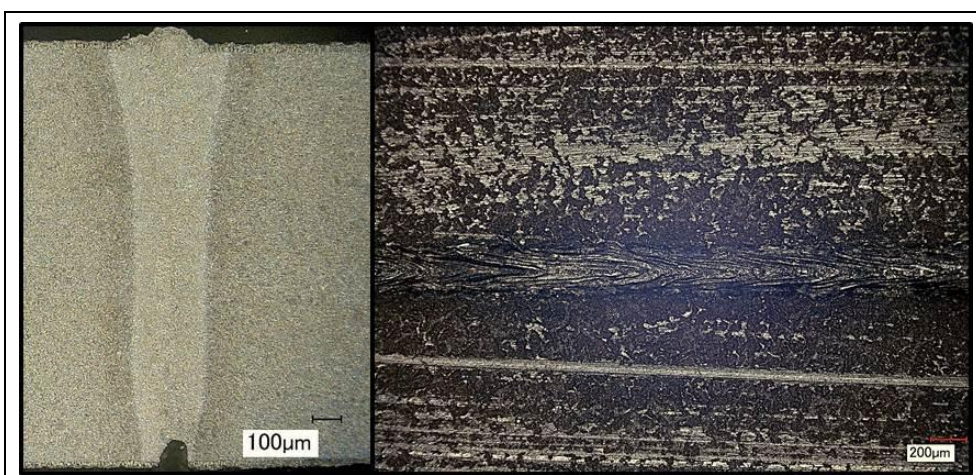


Abbildung 34: Querschliffaufnahme und Darstellung der Nahtoberraupe einer Schweißnaht am 22MnB5

Probendicke: $s = 1,6 \text{ mm}$

Bemerkenswert bei der Sichtbewertung der Schweißnähte war, dass bei keiner der Schweißnähte Humping auftrat. Dies trifft auf beide untersuchte Werkstoffe zu. Es wird vermutet, dass eventuell auftretende Humps durch die mehrfache Überfahrt des Lasers bei der Pendelbewegung beseitigt werden.

5.1.2 Bewertung auf Unregelmäßigkeiten

Um eine fachgerechte Aussage über die Schweißnähte treffen zu können, wird in diesem Kapitel eine Bewertung nach DIN EN ISO 13919-1 [24] vorgenommen. Anhand dieser DIN-Norm werden Schweißnahte auf verschiedene Unregelmäßigkeiten, sowie deren Größe und Menge überprüft. Um hierzu eine vergleichbare Aussage zur Qualität einer Schweißnaht treffen zu können gibt die Norm drei Bewertungsgruppen mit zugehörigen Toleranzbereichen vor. Anhand dieser Bewertungsgruppen kann die Fertigungsqualität von Schweißnähten eingestuft werden. Zur Prüfung der durch Pendelschweißen erzeugten Nähte liegen sowohl Sichtprüfungen unter Verwendung des Mikroskops VHX100 der Firma Keyence wie auch Querschliffaufnahmen zu Grunde, wie sie in den Abschnitten 4.3.2 und 5.1.1 einzusehen sind. Eine Bewertung auf die Nummern 2, 9, 14 und 17 wird nicht vorgenommen.

Tabelle 14: Formelzeichenverzeichnis der DIN EN ISO 13919-1

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
ΔL	Abstand zwischen zwei Unregelmäßigkeiten (Poren, Lunker)	mm
b	Schweißnahtbreite	mm
d	Maximales Maß einer Unregelmäßigkeit (Poren, Lunker)	mm
f	Summe der Hohlraumprojektionsflächen	mm
h	Größe einer Unregelmäßigkeit (Höhe, Tiefe)	mm
l	Länge einer Unregelmäßigkeit (gemessen in jeder Richtung)	mm
L	Zu bewertende Schweißnahtlänge (Schweißnahtprüflänge)	mm
L_c	Länge der Porenanhäufung (beeinflusste Schweißnahtlänge)	mm
s	Werkstückdicke	mm
t	Schmelzzonentiefe	mm

Tabelle 15: Bewertung der Schweißnähte auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten nach DIN EN ISO 13919-1

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten						
	1) Riss	2) Endkraterriß	3) Porosität und Poren	4) Porenester und Porenzeilen		
				a) Höchstmaß für Einzelpore	b) Höchstmaß der Summe der Projektionsflächen	
Bewertungsgruppen	Nicht zulässig	Örtliche Endkrater- risse sind zulässig	I oder h ≤ 0,5s oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 6 %	I oder h ≤ 0,5s oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 6 %	f ≤ 6 %	
	Nicht zulässig	Nicht zulässig	I oder h ≤ 0,4s oder 3 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 2 %	I oder h ≤ 0,4s oder 3 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 2 %	f ≤ 2 %	
	Nicht zulässig	Nicht zulässig	I oder h ≤ 0,3s oder 2 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 0,7 %	I oder h ≤ 0,3s oder 2 mm, kleinerer Wert ist zutreffend f ≤ 0,7 %	f ≤ 0,7 %	
Bewertung der Schweißnähte						
Material	Materialstärke					
X5CrNi18-10	B	B	B	B	B	B
	B	B	B	B	B	B
	B	B	B	B	B	B
22MnB5	B	B	B	B	B	B

Tabelle 13: Fortsetzung

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten						
4) Porennester und Porenzellen		5) Lunker und Endkraterlunker	6) Feste Einschlüsse	7) Bindefehler		
c) Abstand ΔL zwischen Einzelporen		d) Porenanhäufungen				
Bewertungsgruppen	Niedrig D	0,25s oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_C \leq 2s$	I oder $h \leq 0,5s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 6 \%$	Nicht relevant	$h \leq 0,25t$ oder 1 mm, kleinerer Wert ist zutreffend
	Mittel C	0,5s oder 10 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_C \leq s$	I oder $h \leq 0,4s$ oder 3 mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 2 \%$	Nicht relevant	Nicht zulässig
	Hoch B	0,5s oder 15 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$L_C \leq s$	I oder $h \leq 0,3s$ oder 2 mm, kleinerer Wert ist zutreffend $f \leq 0,7 \%$	Nicht relevant	Nicht zulässig
Material	Materialstärke	Bewertung der Schweißnähte				
X5CrNi18-10	s = 1,0 mm	B	B	B	B	D
	s = 1,5 mm	B	B	B	B	D
	s = 2,0 mm	B	B	B	B	B
22MnB5	s = 1,6 mm	B	B	B	B	B

Tabelle 13: Fortsetzung

Grenzwerte für Schweißnahtunregelmäßigkeiten						
		8) Ungenügende Durchschweißung	10) Randkerben	11) Nahtüberhöhung	12) Wurzelüberhöhung	13) Kantenversatz
Bewertungsgruppen	Niedrig D	$h_1 \leq 0,15s$ oder 1 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,15s$ oder 1 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,3s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,3s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend, $f \leq 6 \%$	$h \leq 0,25s$ oder 3 mm, kleinerer Wert ist zutreffend
	Mittel C	Nicht zulässig	$h \leq 0,10s$ oder 0,5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,2s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,2s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend, $f \leq 2 \%$	$h \leq 0,15s$ oder 2 mm, kleinerer Wert ist zutreffend
	Hoch B	Nicht zulässig	$h \leq 0,05s$ oder 0,5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,15s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,15s$ oder 5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend, $f \leq 0,7 \%$	$h \leq 0,10s$ oder 2 mm, kleinerer Wert ist zutreffend
Material	Materialstärke	Bewertung der Schweißnähte				
X5CrNi18-10	s = 1,0 mm	B	Nicht Auswertbar	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	B
	s = 1,5 mm	B	Nicht Auswertbar	Nicht vorhanden	Nicht vorhanden	B
	s = 2,0 mm	B	B	B	Nicht vorhanden	B
22MnB5	s = 1,6 mm	B	B	B	Nicht vorhanden	B

Tabelle 13: Fortsetzung

		15) Nahtunterwölbung	16) Wurzelrückfall	18) Schweißspritzer
	Bewertungsgruppen	Niedrig D	$h \leq 0,3s$ oder 1 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	Die Zulässigkeit hängt vom Anwendungsfall ab. Gilt für Spritzer, die identisch sind mit dem Grundwerkstoff und dem Schweißzusatz.
		Mittel C	$h \leq 0,2s$ oder 0,5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	
		Hoch B	$h \leq 0,1s$ oder 0,5 mm, kleinerer Wert ist zutreffend	
Material	Materialstärke			
X5CrNi18-10	s = 1,0 mm	C	B	Schweißspritzer sind sporadisch bis gar nicht aufgetreten.
	s = 1,5 mm	C	B	
	s = 2,0 mm	Nicht vorhanden	B	
22MnB5	s = 1,6 mm	Nicht vorhanden	B	

5.2 Festigkeitsuntersuchungen

5.2.1 Härtemessung

Die Mikrohärtemessung wurde nach DIN EN ISO 9015-2 [25] durchgeführt. Hierbei wird nach dem Prinzip der Vickers-Härtemessung durch das Eindringen einer Diamantpyramide die Härte des Werkstoffes an verschiedenen Positionen ermittelt. Für die Proben aus X5CrNi18-10 wurde eine Druckkraft von 1,0 N (Bezeichnung: HV0,1) und für den 22MnB5 eine Druckkraft von 2,0 N (Bezeichnung HV0,2) verwendet. Nach DIN EN ISO 9015-2 müssen die Messungen bei einer Materialdicke $s \leq 4$ mm in der Werkstück- bzw. Blechmitte durchgeführt und zwischen den Messpunkten ein Mindestabstand von 0,1 mm eingehalten werden.

Um eine möglichst genaue Messauflösung zu gewährleisten wurden insgesamt drei Messreihen pro Härteprüfung angefertigt. Diese Messreihen sind um jeweils 33 μm zueinander versetzt, wie es in Abbildung 35 an der Probe aus 22MnB5 zu erkennen ist.

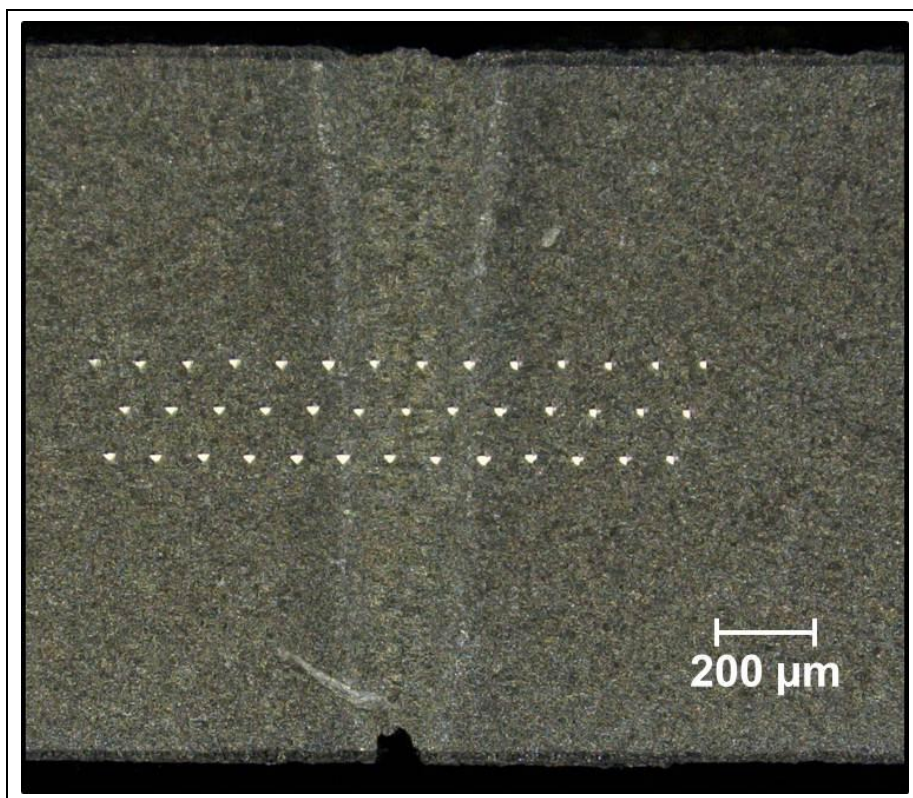


Abbildung 35: Anordnung der Härteeindrücke am Beispiel einer Mikrohärteprüfung am Werkstoff 22MnB5

X5CrNi18-10

Bei der Härteprüfung der Schweißnähte am X5CrNi18-10 müssen die Messungen am 1,5 mm-dicken Material separat betrachtet werden. Es wurde festgestellt, dass bereits das Grundmaterial bei den 1,5 mm starken Probenblechen härter ist als die Proben aus 1,0 mm und 2,0 mm starken Blechen. Dies wird auf eine gartenbedingte Abweichung bei den verwendeten Probenmaterialien zurückgeführt.

Anhand der Härtemessungen wurde festgestellt, dass es bei dem Material X5CrNi18-10 ($s = 1,0$ mm und $s = 2,0$ mm) zu keiner markanten Aufhärtung im direkten Schweißnahtbereich gekommen ist, wie es bei den geradlinigen Schweißungen von Schwind [1] verzeichnet wurde. Die gemessenen Härtewerte belegen einen breiten Bereich von $\pm 0,5$ mm um die Schweißnaht bei dem die Härte auf bis zu 240 N/mm^2 angestiegen ist. Dieser ausgeprägte Aufhärtungsbereich wird der breiteren Intensitätseinbringung durch die pendelnde Strahlführung zugeschrieben und ist in Abbildung 36 zu einzusehen

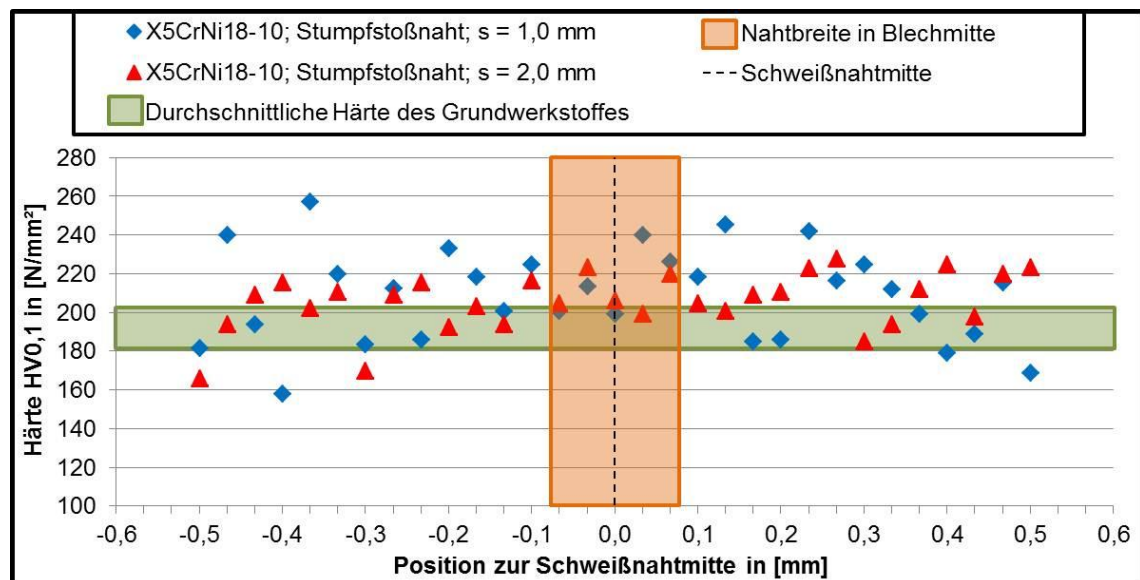


Abbildung 36: Härteverlauf am Werkstoff X5CrNi18-10; Materialstärke: $s = 1,0$ mm und $s = 2,0$ mm

Die Härtemessungen an den Schweißnähten mit einer Materialstärke von $s = 1,5$ mm zeigten vom Härteverlauf her ein ähnliches Bild wie die 1,0 mm- und 2,0 mm-dicken Schweißproben.

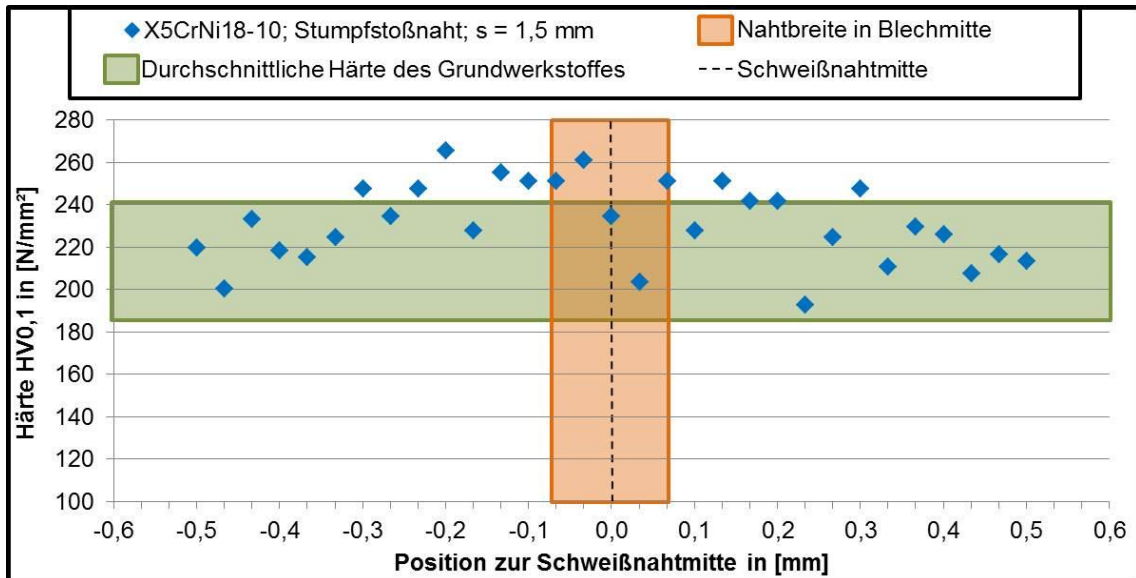


Abbildung 37: Härteverläufe am Werkstoff X5CrNi18-10; Materialstärke: $s = 1,0$ mm

22MnB5

Durch graphische Darstellung der Härtewerte, wie in Abbildung 38 kann eindeutig der Härteanstieg in der Schweißnaht und ein Härteabfall in der WEZ erkannt werden. [26] definiert den Bereich abfallender Härtewerte wie folgt: *Die sogenannte Weiche Zone oder der Härtesack beschreibt einen Bereich in der Wärmeeinflusszone einer Schweißverbindung mit geringerer Härte als der Grundwerkstoff.* Ebenfalls auffällig zeigt sich ein Bereich in der Mitte der Schweißnaht, bei dem die Härtewerte wieder denen des Grundwerkstoffes entsprechen. Dieser Härteabfall ist darauf zurückzuführen, dass die Wärme in der Mitte der Naht am längsten gespeichert bleibt. Hierdurch geht die die Abkühlung langsamer von statten und es kommt dadurch zu einem Entspannen im Gefüge.

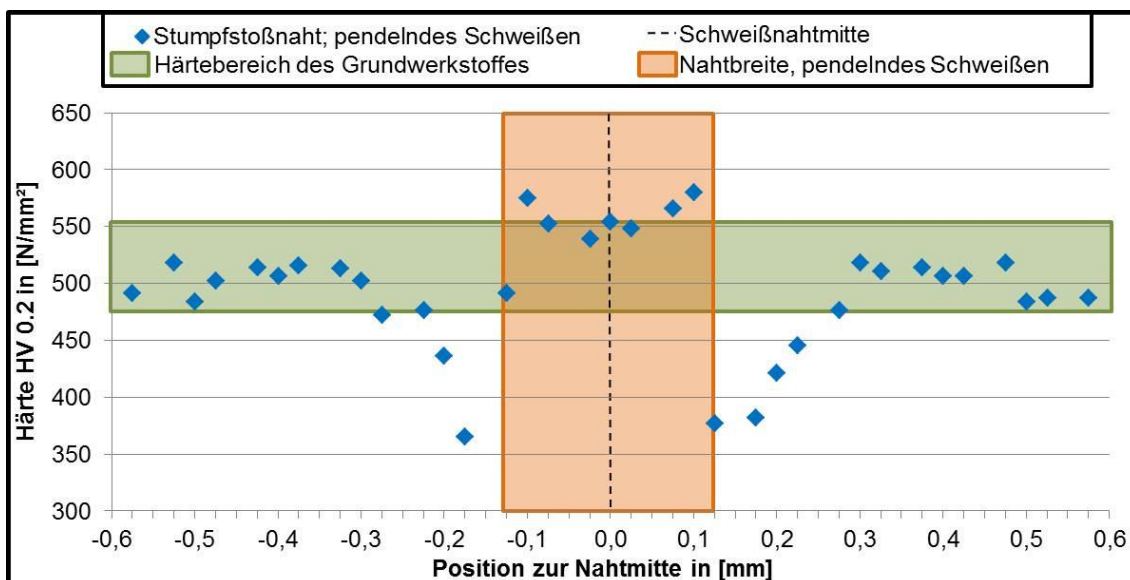


Abbildung 38: Härteverlauf am Werkstoff 22MnB5; Materialstärke $s = 1,6$ mm

Um die Ergebnisse der Härtemessung am 22MnB5 beurteilen zu können, wurden sie den von Schwind ermittelten Werten gegenübergestellt. Obwohl die geradlinig erzeugten Schweißnähte mit abweichenden Prozessparametern und überdies einer anderen Art der Strahlführung erzeugt wurden, ergab der Vergleich einen nahezu einheitlichen Härteverlauf. Zur Darstellung dieses Phänomens sind in Abbildung 39 die Härteverläufe einer gependelten Schweißnaht einer geradlinig Erzeugten Naht sowie die gemessenen Nahtbreiten aufgeführt.

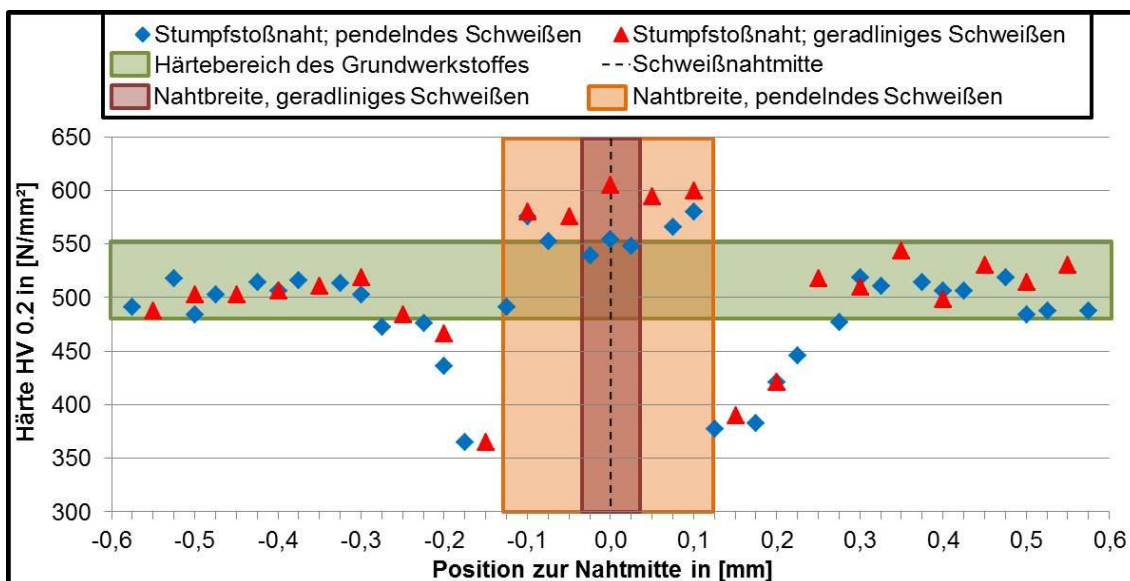


Abbildung 39: Vergleich der Härteverläufe von pendelnder und geradliniger Strahlführung; Materialstärke $s = 1,6$ mm

Die für diese Schweißnähte verwendeten Schweißparameter sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Tabelle 16: Gegenüberstellung der Schweißparameter bei Vergleich der Härteverläufe von geradliniger und gependelter Schweißung

Schweißparameter	Symbol	Geradliniges Schweißen [1]	Pendelndes Schweißen
Applizierte Laserstrahlleistung	P	1840 W	2737,5 W
Fokusbereich	$d_{0,86}$	53 μm	65 μm
Beugungsmaßzahl	M^2	1,16	1,55
Brennweite	f	250	500
Einsatz der Cross-Düse		ja	ja
Strahlführung durch:		PRECITEC Festkopf	Raylase Scanner

5.2.2 Zugprüfung

Nach [27] ist Der Zugversuch ein genormtes Standardverfahren der Werkstoffprüfung zur Bestimmung der Streckgrenze, der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und weiterer Werkstoffkennwerte. Überdies kann hiermit die Belastbarkeit von Volumenkörpern und Verbindungen (bspw. Schweiß- oder Schraubverbindungen) auf Zug untersucht werden.

Die Zugversuche wurden sowohl an den Proben aus X5CrNi18-10 wie auch 22MnB5 nach DIN EN ISO 6892-1 [28] durchgeführt. Hierbei ist darauf zu achten, dass mit zwei verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten gearbeitet wurde. Zunächst mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min bis zu einer Vorspannkraft von 500 N, zur Überwindung der elastischen Verformungsanteile und danach mit 10 mm/min bis zum Bruch der Zugproben.

Die Proben aus X5CrNi18-10 wurden mit der Zugmaschine Inspect Retrofit 100kN MFX der Firma Hegewalt & Peschke gezogen. Da es mit dieser Maschine bei den Proben aus 22MnB5 auf Grund der erhöhten Härte zu einem Durchrutschen während der Zugversuche kam, wurde für diese Proben die Zugmaschine Landmark 500kN der Firma MTS verwendet. Diese Zugmaschine verfügte über hydraulische Spannzangen, mit denen ein Durchrutschen der Proben vermieden werden konnte.

X5CrNi18-10

Die Auswertung der Zugversuche an den drei Materialstärken 1,0 mm, 1,5 mm und 2,0 mm bzw. ein Vergleich der hierzu erstellten Spannungs-Dehnungs-Diagramme, belegt eindeutig, dass die Belastbarkeit auf Zug mit zunehmender Materialstärke ansteigt. Anhand der Abbildungen 40 bis 42 ist eindeutig zu erkennen, dass lediglich die Stumpfstoßnähte an den 2,0 mm dicken Zugproben die Zugfestigkeit wie auch die Dehnungswerte des Grundwerkstoffes erreichten. Dies wird hauptsächlich auf den Nahrückfall zurückgeführt, mit denen die Schweißproben und somit die Zugprobenkörper der Materialstärken 1,0 mm und 1,5 mm behaftet sind. Hierdurch kommt es zu einer Verringerung der Querschnittsfläche und somit nach (Gl. 5-1) zu einer erhöhten Belastung auf Zug an der Schweißnahtposition gegenüber dem Grundwerkstoff.

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A}$$

Gl. 5-1

mit: σ_z ... Zugspannung
 F_z ... Zugkraft
 A ... Querschnittsfläche

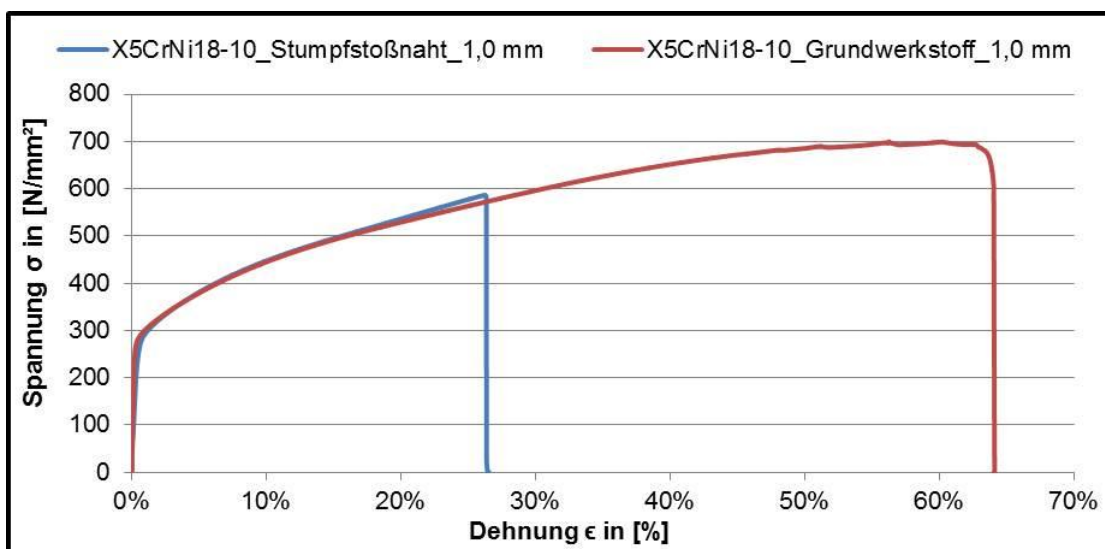


Abbildung 40: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 1,0$ mm

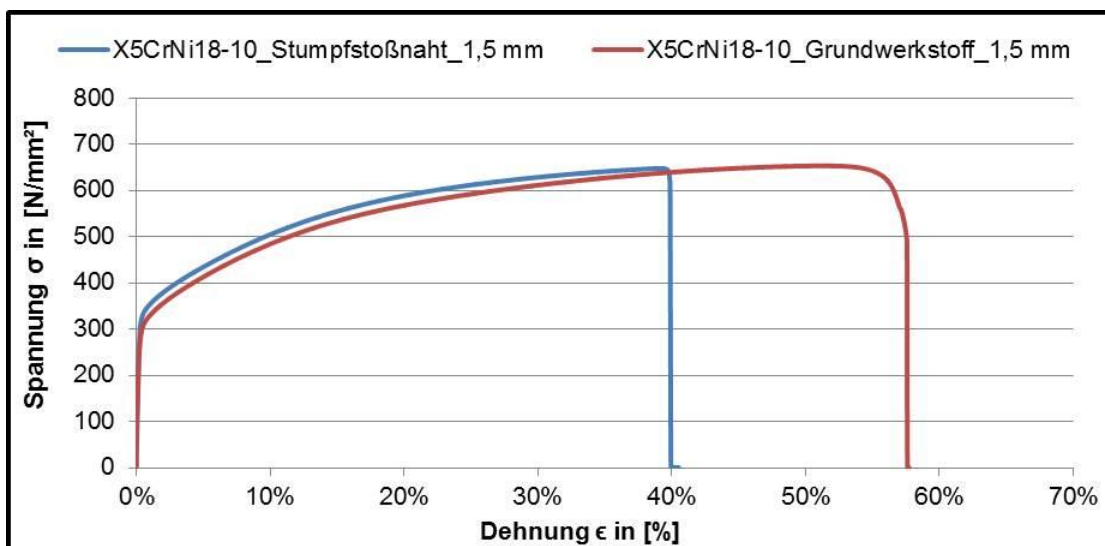


Abbildung 41: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 1,5$ mm

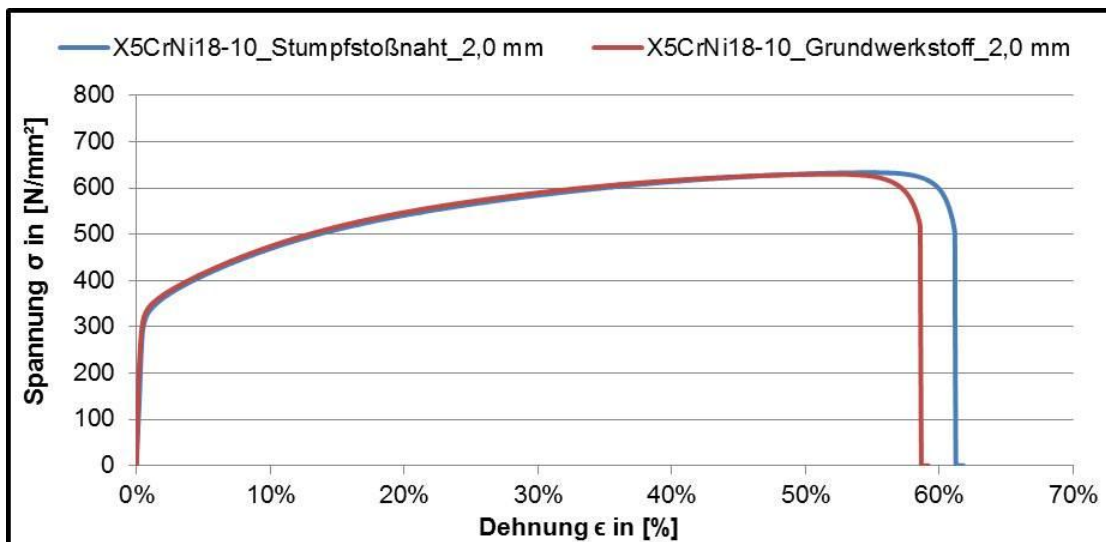


Abbildung 42: Spannungs-Dehnungsdiagramm für X5CrNi18-10; Materialstärke $s = 2,0$ mm

Die geschweißten Zugproben mit der Materialstärke $s = 2,0$ mm erreichten trotz Wurzelrückfall die Festigkeiten des Grundwerkstoffes. Es wird vermutet, dass dies auf die geringe und breit ausgedehnte Aufhärtung durch den Pendelschweißprozess zurückzuführen ist, wie er in Abschnitt 5.2.1 nachgewiesen wurde. Auf Grund dieses sukzessiven Härteanstiegs ist der Bereich der Schweißnaht auch nach dem Schweißprozess zäh und kann Zugspannungen durch Verformungen abbauen.

22MnB5

Da der Werkstoff 22MnB5 lediglich mit einer Materialstärke von 1,6 mm untersucht wurde, kann keine Aussage dazu getroffen werden, wie sich eine veränderte Probendicke auf das Schweißergebnis bzw. ertragbare Zugbelastung auswirkt. Wie der Abbildung 43 zu entnehmen ist, erreichten die Stumpfstoßschweißverbindungen mit durchschnittlich 1400 N/mm² nicht die Zugfestigkeiten des Grundwerkstoffes und rissen bei einer wesentlich geringeren Dehnung. Dies wird auf den Wurzelrückfall zurückgeführt, mit dem jede Schweißnaht behaftet war. Das vergleichsweise harte Material ist nicht in der Lage die auftretenden Zugspannungen über Verformung abzubauen.

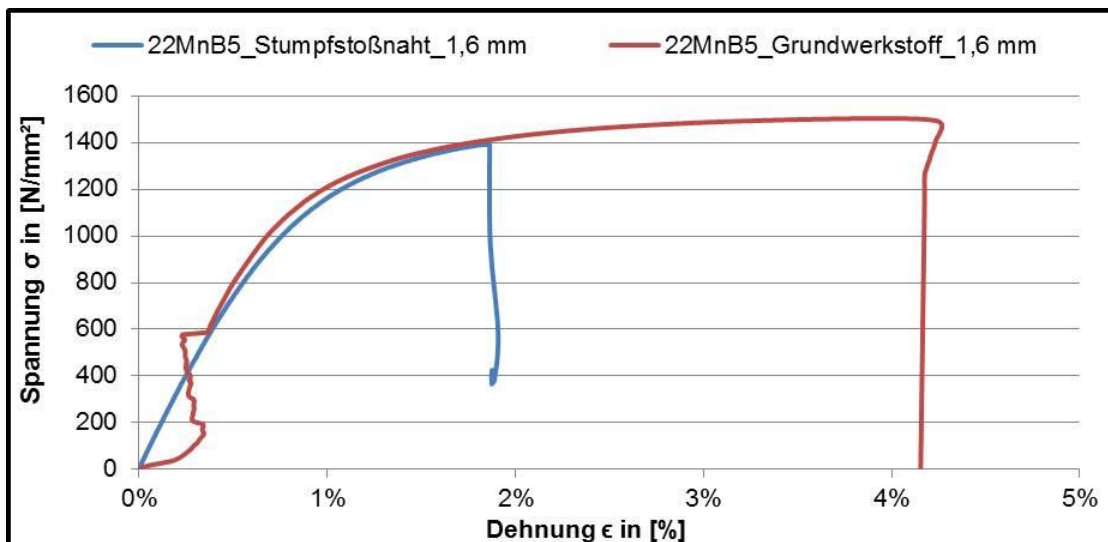


Abbildung 43: Spannungs-Dehnungsdiagramm für 22MnB5; Materialstärke $s = 1,6 \text{ mm}$

Da sämtliche Proben in der Schweißnaht rissen wird die Begründung für das frühzeitige Versagen der Kerbwirkung durch den Wurzelsrückfall zugeschrieben, der sich bei jeder Stumpfstoßschweißung gebildet hat. Wie in der Abbildung 44 zu erkennen ist, verläuft der Bruch bei den Stumpfstoßverbindungen entlang der Nahtflanken und nicht diagonal zur angreifenden Zugkraft, wie es an der Zugprobe des Grundwerkstoffes zu erkennen ist.

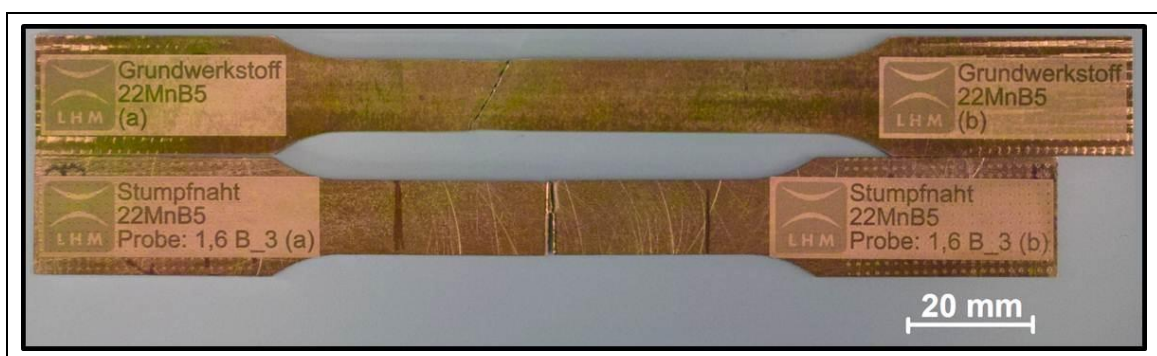


Abbildung 44: Gegenüberstellung einer Zugprobe mit Stumpfstoßnaht und der Grundwerkstoff-Zugprobe

6 Zusammenfassung / Fazit

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde das Schweißen mit überlagerter Bahnbewegung behandelt. Hierfür wurden Konturformen durch oszillierende und pendelnde Strahlführung untersucht

Beginnend wurde eine Überprüfung auf Konturtreue und Maßhaltigkeit vorgenommen um zuverlässige Ergebnisse in weiterführenden Untersuchungen zu gewährleisten. Hierbei hat sich herausgestellt, dass beim Erzeugen der Nahtkonturen weder die Maße noch die programmierten Konturformen eingehalten wurden.

Aus diesem Grund musste eine Anpassung der Eingabeparameter vorgenommen werden. Bei der Konturerzeugung durch oszillierende Strahlführung konnte dies durch eine Offsetberechnung für die Eingabeparameter Wobbelradius r_2 und Radienverhältnis V erreicht werden. Bei der pendelnden Strahlführung wurden Maß- und Konturtreue durch Feineinstellung des Eingabeparameters Polygon-Delay erreicht.

Nach Sicherstellung einer stabilen Konturerzeugung wurden die maximalen Bahn- und Vorschubgeschwindigkeiten ermittelt, die mit dem vorliegenden Versuchsaufbau, respektive den verwendeten Komponenten erreichbar waren. Innerhalb der untersuchten geometrischen Begrenzungen ergaben sich bei der Erstellung von Wobbelkonturen Bahngeschwindigkeiten zwischen $v_B = 2,0 \text{ m/s}$ und $v_B = 3,25 \text{ m/s}$. Die ermittelten Vorschubgeschwindigkeiten lagen zwischen $v_f = 0,25 \text{ m/s}$ und $v_f = 0,40 \text{ m/s}$.

Bei der gependelten Konturform sind die ermittelten Geschwindigkeiten abhängig von Pendelbreite und Schrittweite. Die Bestimmung der maximalen Geschwindigkeiten wurde bei den vier untersuchten Pendelbreiten bei einer Schrittweite von $225 \mu\text{m}$ beschränkt. Die maximal erreichten Bahngeschwindigkeiten lagen somit zwischen $v_B = 0,38 \text{ m/s}$ und $v_B = 1,12 \text{ m/s}$. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit lag bei einer eingestellten Bahngeschwindigkeit von $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$ bei allen vier Pendelbreiten $v_f = 0,78 \text{ m/s}$

Der Vergleich der Bahn- und Vorschubgeschwindigkeiten der beiden Konturformen belegt, dass bei Erzeugung der Wobbelkontur höhere Bahn- aber gerin-

gere Vorschubgeschwindigkeiten als bei der Pendelkontur erzeugt wurden. Dies resultiert aus der größeren Bahnlänge, die bei oszillierender Strahlführung entsteht gegenüber der Bahnlänge bei pendelnder Strahlführung.

Anhand von Blind- und Stumpfstoßschweißungen wurden die Durchschweißgeschwindigkeiten für die untersuchten Materialien und Materialstärken ermittelt. Dies wurde mit und ohne den Einsatz der Cross-Düse durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass bei dem Material 22MnB5 der Einsatz der Cross-Düse für ein erfolgreiches Durchschweißen notwendig ist. Bei dem Werkstoff X5CrNi18-10 führte der Einsatz der Cross-Düse zu einer Steigerung der Durchschweißgeschwindigkeit von 4 bis 30 %, je nach Materialstärke.

Für den zinkbeschichteten Werkstoff 22MnB5 mit einer Materialstärke von $s = 1,6 \text{ mm}$ ergab sich eine maximale Durchschweißgeschwindigkeit von $v_f = 0,32 \text{ m/s}$.

Für den Werkstoff X5CrNi18-10 wurden bei den drei untersuchten Materialstärken die maximalen Durchschweißgeschwindigkeiten $v_f = 0,69 \text{ m/s}$ ($s = 1,0 \text{ mm}$), $v_f = 0,60 \text{ m/s}$ ($s = 1,5 \text{ mm}$) und $v_f = 0,46 \text{ m/s}$ ($s = 2,0 \text{ mm}$) ermittelt.

Basierend auf den Versuchsreihen zur Bestimmung der Durchschweißgeschwindigkeiten wurden Schweißnähte für die Durchführung von Schweißnahtbewertungen sowie Zug- und Härteprüfungen erzeugt.

Die Schweißnähte am Werkstoff 22MnB5 wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_f = 0,32 \text{ m/s}$ erzeugt. Für die Schweißnähte am X5CrNi18-10 wurden die Vorschubgeschwindigkeiten $v_f = 0,57 \text{ m/s}$ ($s = 1,0 \text{ mm}$), $v_f = 0,43 \text{ m/s}$ ($s = 1,5 \text{ mm}$) und $v_f = 0,29 \text{ m/s}$ ($s = 2,0 \text{ mm}$) verwendet.

Die Schweißnahtbewertungen erfolgten durch Sichtprüfungen und die Prüfung auf Schweißnahtunregelmäßigkeiten, basierend auf Querschliffaufnahmen sowie der Analyse der Schweißnahtober- und unterseiten. Hierbei zeigt sich zunächst, dass sich bei sämtlichen Schweißnähten eine gleichmäßige, humpingfreie Nahtoberseite ausbilden. Jedoch sind beim Werkstoff X5CrNi18-10 die Materialstärken $s = 1,0 \text{ mm}$ und $s = 1,5 \text{ mm}$ durchweg mit Nahtunterwölbung behaftet. Weiterhin zeigt sich bei sämtlichen Schweißnähten Wurzelrückfall, der

aber nach DIN EN ISO 13919-1 innerhalb der Toleranz der Bewertungsgruppe B liegt.

Abschließend sollten Festigkeitsuntersuchungen an den erzeugten Schweißnähten vorgenommen werden. Hierzu wurden sowohl Härteprüfungen wie auch Zugversuche durchgeführt.

Anhand der Härtemessungen wurde festgestellt, dass es bei dem Material X5CrNi18-10 ($s = 1,0$ mm und $s = 2,0$ mm) zu keiner markanten Aufhärtung im direkten Schweißnahtbereich gekommen ist, wie es bei den geradlinigen Schweißungen von Schwind [1] verzeichnet wurde. Die gemessenen Härtewerte belegen einen breiten Bereich von $\pm 0,5$ mm um die Schweißnaht bei dem die Härte auf bis zu 240 N/mm^2 angestiegen ist. Dieser ausgeprägte Aufhärtungsbereich wird der breiteren Intensitätseinbringung durch die pendelnde Strahlführung zugeschrieben.

Die Härtemessungen an den Schweißnähten am X5CrNi18-10 mit einer Materialstärke von $s = 1,5$ mm zeigten vom Härteverlauf her ein ähnliches Bild wie die $1,0$ mm- und $2,0$ mm-dicken Schweißproben. Jedoch ist hierbei die maximale Härte bis auf 265 N/mm^2 angestiegen. Es wurde allerdings bereits ein Härteunterschied des Grundwerkstoffes beim $1,5$ mm-Blech zu den $1,0$ - und $1,5$ mm starken Probenblechen ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass es sich hierbei um eine gartenabhängige Abweichung bei dem Probenmaterial handelte.

Bei den Härtemessungen am Probenwerkstoff 22MnB5 stellten sich sowohl ein Härteanstieg in der Schweißnaht wie auch ein Härteabfall an den Nahtflanken heraus. Der maximal beobachtete Härteanstieg erreichte hierbei 580 N/mm^2 und der stärkste Härteabfall wurde mit 365 N/mm^2 gemessen.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurde der Härteverlauf der gependelten Naht einer geradlinig Erzeugten Schweißnaht von Schwind gegenübergestellt. Es stellte sich heraus, dass die Schweißnähte trotz abweichender Schweißparameter sowie Strahlführungen einen nahezu identischen Härteverlauf aufwiesen. Eine Begründung für dieses Phänomen konnte hierfür nicht gefunden werden. Zur Klärung dieses Sachverhalts wäre es notwendig Schweißversuche mit pen-

delnder Strahlführung durch einen Galvanometerscanner und geradliniger Schweißung durch eine feste Bearbeitungsoptik zu rekonstruieren.

Anhand der Resultate, die in dieser Arbeit ermittelt und dargelegt wurden stellt sich das Schweißen mit überlagerten Bahnbewegungen als ein Schweißprozess mit Potential dar. Jedoch wiesen die ermittelten Geschwindigkeiten und speziell die dabei festgestellten Grenzen auf eine Problematik hinsichtlich dieses Schweißverfahrens hin. Obwohl die Galvanometerscanner aktuell zu den schnellsten Gerätschaften für die Strahlführung zählen, kommen auch diese bei der Umsetzung mehrerer simultaner Bewegungen an ihre Leistungsgrenzen.

Aus diesem Grund wäre für künftige Untersuchungen die Aufteilung der Bewegungen auf mehrere Komponenten ratsam. Dies könnte beispielsweise umgesetzt werden durch die Kombination von Scanner und Achsensystem oder durch den Zusammenschluss mehrerer Scanner oder Ähnlichem.

Auf diese Weise können durch Anpassung der Anlagentechnik durchaus höhere Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden

Ebenso können die Durchschweißgeschwindigkeiten und die Einschweißtiefen erhöht werden, wenn eine Steigerung der Pendel- bzw. Wobbelfrequenzen erreicht wird.

Quellenangabe

- [1] Schwind, Sascha: Hochgeschwindigkeitslaserschweißen mit einem 3kW Monomode Faserlaser; – 2013 – 9, 72, 2 S. Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), Fakultät Maschinenbau, Masterarbeit; 2013
- [2] Alexander, Müller; Sven-Frithjof, Goecke; Florian, Albert; Pravin, Sievi; Sebastian, Baum; Michael Rethmeier: Nahtgeführtes Laserstrahl-Remoteschweißen mit Strahloszillation; Technische Universität Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb; Veröffentlicht in: Schweißen und Schneiden, 65. Jahrgang (2013), Heft 09, S. 631-635
- [3] Norm DIN EN 1011-6: Empfehlung zum Schweißen metallischer Werkstoffe – Teil 6: Laserschweißen; 2005
- [4] David, Havrilla; Volker, Rominger; Marco, Holzer; Thomas, Harrer; Andrey, Andreev: Advanced welding techniques with optimized accessories for high brightness 1 μm lasers; TRUMPF Inc., TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH; o.J.
- [5] Albert, Florian; Alexander, Müller; Pravin Sievi: Laserstrahl-Remoteschweißen – Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand system- und prozesstechnischer Beispiele; Scansonic MI GmbH; Veröffentlicht in: WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. Weinheim; 2013
- [6] M. Schweier; J. F. Heins; M. W. Haubold; M. F. Zaeh: Spatter formations in laser welding with beam oscillation; Technische Universität München, Institute for Machine Tools and Industrial Management; 2013
- [7] Mathias, Kraetzsch; Jens, Standfuss; Annett, Klotzbach; Joerg, Kaspar; Berndt, Brenner; Eckhard, Beyer: Laser Beam Welding with High-Frequency Beam Oscillation: Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fiber Lasers; Fraunhofer IWS Dresden; 2011

-
- [8] Markus, Schweier; Jens, Hatwig; Michael, F. Zaeh; Johannes, Reppich: Single Mode Fiber Laser Beam Welding with Superposed Beam Oscillation; Technische Universität München, Institute for Machine Tools and Industrial Management; o.J
- [9] IPG Laser GmbH: Benutzerhandbuch: YLR-3000-SM Ytterbium Faser Laser; o.O; 2015
- [10] J. Drechsel; U. Löschner; S. Schwind; H. Exner: Laserschweißen von hochfestem Stahl 22MnB5 mit Hochleistungs-Monomode-Faserlaser; Laserinstitut der Hochschule Mittweida; 2013
- [11] SILL Optics: Datenblatt: F-Theta-Optic S4LFT1500/328; Sill Optics GmbH&Co.KG; o.J
- [12] Produktkatalog, Kapitel 2.28: Horizontalschnellspanner; DE-STA-CO Europe GmbH; 2013
- [13] Newport: Gaußsche Strahloptik; URL: www.newport.com/Gaußsche-Strahloptik/144899/1031/content.aspx; 23.08.2014
- [14] Metallograf: Beraha-II Ätzmittel; URL: www.metallograf.de/start.htm?/probenvorbereitung/mikro17.htm; 27.05.2014
- [15] Informationsstelle Edelstahl Rostfrei: Merkblatt 821: Edelstahl Rostfrei-Eigenschaften; Düsseldorf; o.J
- [16] Wikipedia: Edelstahl; URL: [http://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl#WNR. 1.4301 .28X5CrNi18-10.29.2C AISI 304 .28V2A.29](http://de.wikipedia.org/wiki/Edelstahl#WNR.1.4301_.28X5CrNi18-10.29.2C_AISI_304_.28V2A.29); 06.03.2014
- [17] ThyssenKrupp Materials International GmbH: Datenblatt:1.4301, X5CrNi18-10;Mühlheim a. d. Ruhr; 2007

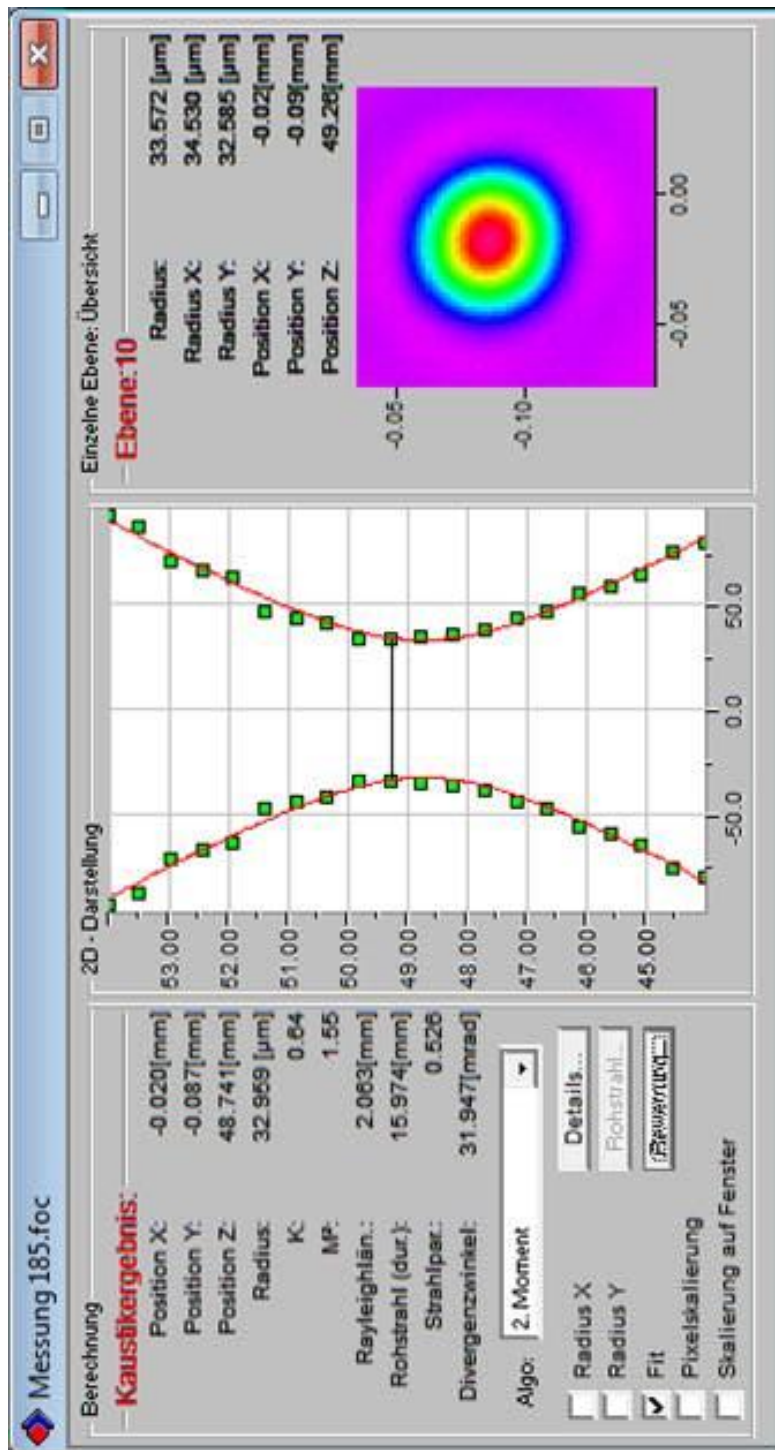
-
- [18] ThyssenKrupp Steel AG: Datenblatt: 22MnB5; Duisburg; 09.2008
- [19] Salzgitter Flachstahl GmbH: Datenblatt: 22MnB5; Salzgitter; 07.2007
- [20] LBC Engineerings: Lasergenerierte Bauteile; URL: http://www.lasergenerieren.de/de/faq/oberflaechenrauhigkeit-lasergenerierter-bauteile_50.php; 27.05.2014
- [21] Felix, Schmitt; Benjamin, Mehlmann; Jens, Gedicke; Alexander, Olowinsky; Arnold, Gillner; Reinhart, Poprawe; Laser Beam Micro Welding With High Brilliant Fiber Lasers; Fraunhofer Institute for Laser Technology; Aachen; Veröffentlicht in: JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol.5, No.3,; 2010
- [22] Scanlab AG: Benutzerhandbuch: RTC4 PC-Interfacekarte; Puchheim; 2008
- [23] Norm DIN EN ISO 17637: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen-Sichtprüfung von Schmelzschweißverbindungen; 2003
- [24] Norm DIN EN ISO 13919-1: Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen, Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten-Teil 1: Stahl; 1996
- [25] Norm DIN EN ISO 9015-2: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen-Härteprüfung-Teil 2: Mikrohärteprüfung an Schweißverbindungen; 2011
- [26] Franz Alois, Hochhauser: Die weiche Zone beim Schweißen Hochfester Stähle; -2012-; 160 S; Wirtschaftsingenieurswesen – Maschinenbau; Produktionstechnik; Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
- [27] Wikipedia: Zugversuch; URL: <http://www.wikipedia.org/wiki/Zugversuch>; 18.02.2014

-
- [28] Norm DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe-Zugversuch-Teil 1:
Prüfverfahren bei Raumtemperatur; 2009

Anlagenverzeichnis

Anlage A: Vollständige Ergebnisdarstellung der Strahlvermessung	VII
Anlage B: Vergleich der Herstellerangaben zur chemischen Zusammensetzung des X5CrNi18-10 mit einer Vakuumemissionsspektroskopieanalyse nach Schwind [1]	VIII
Anlage C: Vergleich der Herstellerangaben zur chemischen Zusammensetzung des 22MnB5 mit einer Vakuumemissionsspektroskopieanalyse nach Schwind [1].....	IX
Anlage D: Zusammenstellung der korrigierten Eingabeparameter für die Wobbelkontur; $v_{B_SOLL} = 0,5 \text{ m/s}$ bis $v_{B_SOLL} = 4,0 \text{ m/s}$	X
Anlage E: Zusammenstellung der korrigierten Eingabeparameter für die Wobbelkontur; $v_{B_SOLL} = 4,5 \text{ m/s}$ bis $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$	XI
Anlage F: Herleitung der Gleichung (Gl. 4-8).....	XII
Anlage G: Zusammenstellung der beim Pendelschweißen ermittelten Bahn- und Vorschubgeschwindigkeiten sowie Pendelfrequenzen	XIII

Anlage A



Anlage A: Vollständige Ergebnisdarstellung der Strahlvermessung

Anlage B

Anlage B: Vergleich der Herstellerangaben zur chemischen Zusammensetzung des X5CrNi18-10 mit einer Vakuumemissionsspektroskopieanalyse nach Schwind [1]

Element	Herstellerangaben in [%]	Vakuumemissionsspektroskopie in [%]
C	≤ 0,07	0,019
Si	≤ 1,00	0,39
Mn	≤ 2,00	1,81
P	≤ 0,045	0,0088
S	≤ 0,015	0,0002
Cr	≤ 17,0 -19,5	18,2
Ni	≤ 8,0 -10,5	8,41
N	≤ 0,11	-
Mo	-	0,304
Nb	-	0,011
Ti	-	0,005

Anlage C

Anlage C: Vergleich der Herstellerangaben zur chemischen Zusammensetzung des X5CrNi18-10 mit einer Vakuumemissionsspektroskopieanalyse nach Schwind [1]

Element	Herstellerangaben in [%] Grundwerkstoff	Vakuumemissions- spektroskopie in [%] Grundwerkstoff	Vakuumemissions- spektroskopie in [%] Zink-Beschichtung
C	≤ 0,25	0,261	8,06
Mn	≤ 1,4	1,105	9,39
Si	≤ 0,4	0,26	4,58
P	≤ 0,025	0,0236	-
S	≤ 0,01		
Ti	≤ 0,05		
Cr	≤ 0,5		
Mo	≤ 0,5		
B	≤ 0,005		
Ni	-		
O	-		
Fe	Rest		
Zn	-		

Anlage D

Anlage D: Zusammenstellung der korrigierten Eingabeparameter für die Wobbelkontur;

$v_{B_SOLL} = 0,5 \text{ m/s}$ bis $v_{B_SOLL} = 4,0 \text{ m/s}$

	Korrigierte Eingabeparameter					
	$v_{B_SOLL} = 0,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 1,0 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 1,5 \text{ m/s}$	
r2	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-	in [mm]	-
0,25	0,26	0,6849	0,25	0,6899	0,27	0,7062
0,30	0,30	0,6779	0,29	0,6806	0,30	0,6864
0,35	0,34	0,6798	0,34	0,6804	0,36	0,6891
0,40	0,39	0,6811	0,38	0,6741	0,39	0,6816
0,45	0,44	0,6811	0,43	0,6741	0,44	0,6816
0,50	0,48	0,6726	0,48	0,6720	0,48	0,6756
0,55	0,53	0,6721	0,52	0,6720	0,53	0,6744
0,60	0,57	0,6721	0,56	0,6671	0,57	0,6744
0,65	0,62	0,6706	0,61	0,6705	0,62	0,6701
0,70	0,67	0,6719	0,66	0,6739	0,66	0,6718
0,75	0,71	0,6792	0,71	0,6675	0,71	0,6684
	$v_{B_SOLL} = 2,0 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 2,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 3,0 \text{ m/s}$	
r2	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-	in [mm]	-
0,25	0,28	0,6997	0,30	0,7231	0,30	0,7267
0,30	0,32	0,6997	0,35	0,6968	0,36	0,7178
0,35	0,37	0,6989	0,38	0,6908	0,40	0,7096
0,40	0,41	0,6921	0,42	0,6908	0,45	0,7096
0,45	0,45	0,6921	0,47	0,6908	0,49	0,6910
0,50	0,50	0,6806	0,51	0,6873	0,52	0,6910
0,55	0,54	0,6793	0,56	0,6866	0,53	0,6739
0,60	0,59	0,6768	0,60	0,6792	0,61	0,6875
0,65	0,63	0,6746	0,64	0,6765	0,66	0,6834
0,70	0,67	0,6746	0,68	0,6769	0,70	0,6781
0,75	0,72	0,6733	0,72	0,6769	0,75	0,6814
	$v_{B_SOLL} = 3,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 4,0 \text{ m/s}$			
r2	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}		
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-		
0,25	0,36	0,7234	0,37	0,7167		
0,30	0,36	0,7234	0,41	0,7119		
0,35	0,41	0,7206	0,40	0,7119		
0,40	0,46	0,7206	0,45	0,7119		
0,45	0,50	0,7089	0,50	0,7058		
0,50	0,56	0,6991	0,55	0,7046		
0,55	0,59	0,6898	0,60	0,6980		
0,60	0,62	0,6898	0,65	0,6948		
0,65	0,66	0,6873	0,69	0,6930		
0,70	0,70	0,6833	0,74	0,6850		
0,75	0,75	0,6821	0,76	0,6850		

Anlage E

Anlage E: Zusammenstellung der korrigierten Eingabeparameter für die Wobbelkontur;

$v_{B_SOLL} = 4,5 \text{ m/s}$ bis $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$

	Korrigierte Eingabeparameter					
	$v_{B_SOLL} = 4,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 5,0 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 5,5 \text{ m/s}$	
r2	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-	in [mm]	-
0,25	0,40	0,7174	0,42	0,7570	0,43	0,7712
0,30	0,44	0,7174	0,45	0,7570	0,48	0,7312
0,35	0,49	0,7073	0,50	0,7122	0,51	0,7312
0,40	0,48	0,7073	0,54	0,7009	0,55	0,7111
0,45	0,53	0,7029	0,59	0,6963	0,60	0,7010
0,50	0,59	0,7012	0,60	0,6963	0,62	0,7010
0,55	0,64	0,6986	0,65	0,6964	0,66	0,6965
0,60	0,70	0,6924	0,70	0,6950	0,70	0,6934
0,65	0,75	0,6920	0,75	0,6950	0,75	0,6933
0,70	0,80	0,6921	0,81	0,6876	0,80	0,6892
0,75	0,85	0,6838	0,86	0,6947	0,85	0,6930
	$v_{B_SOLL} = 6,0 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 6,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 7,0 \text{ m/s}$	
	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-	in [mm]	-
0,25	0,42	0,7798	0,43	0,7860	0,43	0,8064
0,30	0,48	0,7476	0,48	0,7529	0,48	0,7587
0,35	0,53	0,7516	0,53	0,7483	0,53	0,7501
0,40	0,56	0,7516	0,57	0,7483	0,59	0,7439
0,45	0,61	0,7353	0,61	0,7334	0,62	0,7439
0,50	0,66	0,7015	0,67	0,7295	0,68	0,7302
0,55	0,73	0,6881	0,72	0,7171	0,73	0,7244
0,60	0,76	0,6881	0,77	0,7000	0,79	0,7154
0,65	0,76	0,6881	0,82	0,6967	0,83	0,6981
0,70	0,81	0,6918	0,87	0,6901	0,88	0,6981
0,75	0,85	0,6914	0,88	0,6901	0,94	0,6939
	$v_{B_SOLL} = 7,5 \text{ m/s}$		$v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$			
	r2 _{NEU}	V _{NEU}	r2 _{NEU}	V _{NEU}		
in [mm]	in [mm]	-	in [mm]	-		
0,25	0,43	0,7989	0,42	0,8005		
0,30	0,48	0,7631	0,49	0,7631		
0,35	0,53	0,7541	0,53	0,7516		
0,40	0,58	0,7470	0,58	0,7420		
0,45	0,62	0,7470	0,62	0,7420		
0,50	0,68	0,7267	0,68	0,7302		
0,55	0,73	0,7259	0,73	0,7271		
0,60	0,79	0,7231	0,78	0,7251		
0,65	0,84	0,7139	0,83	0,7231		
0,70	0,89	0,7139	0,89	0,7231		
0,75	0,94	0,6949	0,95	0,7146		

Anlage F

Anlage F: Herleitung der Gleichung (Gl. 4-8)

$$l_B = \frac{l_N}{r_2} * \pi * (r_1 + r_2)$$

$$l_B = \frac{l_N}{r_2} * \pi * \left(\frac{3}{2}r_2 + r_2\right)$$

$$l_B * r_2 = l_N * \pi * \left(\frac{5}{2}r_2\right)$$

$$\frac{l_B * \frac{2}{2}r_2}{\frac{5}{2}r_2} = l_N * \pi$$

$$l_B * \frac{2}{5} = l_N * \pi$$

$$l_B = l_N * \frac{5}{2} * \pi$$

mit: l_B ... Bahnlänge

l_N ... Nahtlänge

r_1 ... großer Wobbelradius

r_2 ... kleiner Wobbelradius

Anlage G

Anlage G: Zusammenstellung der beim Pendelschweißen ermittelten Bahn- und Vorschubgeschwindigkeiten sowie Pendelfrequenzen

Geschwindigkeitentabelle für $v_{B_SOLL} = 8,0 \text{ m/s}$												
Lineare Vorschubgeschwindigkeit v_f ; Bahngeschwindigkeit v_B ; Pendelfrequenz u_P												
	Y = 0,10 mm			Y = 0,15 mm			Y = 0,20 mm			Y = 0,25 mm		
S	v_f	v_B	u_P	v_f	v_B	u_P	v_f	v_B	u_P	v_f	v_B	u_P
mm	m/s	m/s	s ⁻¹	m/s	m/s	s ⁻¹	m/s	m/s	s ⁻¹	m/s	m/s	s ⁻¹
0,005	0,02	0,36	1838	0,02	0,54	1786	0,02	0,71	1773	0,02	0,89	1773
0,010	0,04	0,36	1838	0,04	0,54	1786	0,04	0,72	1786	0,04	0,89	1786
0,015	0,05	0,36	1812	0,05	0,54	1781	0,05	0,71	1781	0,05	0,89	1781
0,020	0,07	0,37	1736	0,07	0,54	1796	0,07	0,71	1776	0,07	0,90	1796
0,025	0,09	0,36	1786	0,09	0,54	1786	0,09	0,71	1761	0,09	0,88	1761
0,030	0,11	0,37	1812	0,11	0,54	1781	0,11	0,71	1766	0,11	0,89	1766
0,035	0,13	0,38	1786	0,13	0,55	1786	0,13	0,73	1786	0,13	0,90	1786
0,040	0,14	0,38	1736	0,14	0,56	1796	0,14	0,72	1776	0,14	0,90	1776
0,045	0,16	0,39	1736	0,16	0,56	1781	0,16	0,73	1781	0,16	0,90	1781
0,050	0,18	0,40	1786	0,18	0,56	1786	0,18	0,73	1761	0,18	0,91	1786
0,055	0,19	0,41	1748	0,20	0,57	1776	0,20	0,74	1776	0,20	0,91	1776
0,060	0,21	0,42	1766	0,21	0,57	1766	0,21	0,74	1766	0,22	0,92	1796
0,065	0,23	0,42	1781	0,23	0,57	1748	0,23	0,75	1781	0,23	0,90	1748
0,070	0,25	0,43	1751	0,25	0,58	1751	0,25	0,76	1786	0,25	0,91	1751
0,075	0,27	0,44	1773	0,27	0,59	1773	0,27	0,76	1773	0,27	0,93	1773
0,080	0,28	0,44	1776	0,28	0,60	1776	0,28	0,75	1736	0,28	0,91	1736
0,085	0,30	0,47	1751	0,30	0,62	1793	0,30	0,78	1793	0,30	0,95	1793
0,090	0,32	0,48	1781	0,32	0,62	1781	0,32	0,78	1781	0,32	0,95	1781
0,095	0,34	0,48	1778	0,34	0,63	1778	0,33	0,77	1731	0,33	0,93	1731
0,100	0,36	0,49	1786	0,36	0,64	1786	0,35	0,78	1736	0,35	0,93	1736
0,105	0,37	0,52	1751	0,37	0,64	1751	0,37	0,79	1751	0,38	0,98	1804
0,110	0,39	0,53	1776	0,39	0,66	1776	0,39	0,81	1776	0,39	0,97	1776
0,115	0,40	0,55	1753	0,42	0,68	1812	0,40	0,81	1753	0,42	1,00	1812
0,120	0,43	0,56	1796	0,43	0,69	1796	0,43	0,84	1796	0,43	1,00	1796
0,125	0,45	0,57	1786	0,45	0,70	1786	0,45	0,84	1786	0,45	1,00	1786
0,130	0,45	0,58	1717	0,46	0,71	1781	0,46	0,85	1781	0,46	1,00	1781
0,135	0,48	0,58	1781	0,48	0,72	1781	0,48	0,86	1781	0,46	0,97	1715
0,140	0,50	0,61	1786	0,50	0,73	1786	0,48	0,84	1717	0,50	1,02	1786
0,145	0,52	0,61	1796	0,52	0,75	1796	0,52	0,89	1796	0,50	1,00	1724
0,150	0,52	0,60	1736	0,52	0,74	1736	0,52	0,87	1736	0,50	0,97	1667
0,155	0,54	0,62	1753	0,54	0,76	1753	0,54	0,89	1753	0,52	0,99	1680
0,160	0,57	0,64	1776	0,57	0,78	1776	0,57	0,91	1776	0,54	1,01	1698
0,165	0,60	0,64	1804	0,57	0,77	1722	0,57	0,89	1722	0,54	0,99	1647
0,170	0,60	0,66	1751	0,57	0,76	1671	0,60	0,92	1751	0,57	1,01	1671
0,175	0,63	0,69	1786	0,63	0,82	1786	0,63	0,95	1786	0,60	1,04	1701
0,180	0,63	0,71	1736	0,63	0,81	1736	0,66	0,98	1827	0,63	1,07	1736
0,185	0,66	0,71	1778	0,66	0,85	1778	0,63	0,92	1689	0,63	1,05	1689
0,190	0,66	0,74	1731	0,66	0,84	1731	0,63	0,91	1645	0,66	1,09	1731
0,195	0,69	0,74	1781	0,69	0,88	1781	0,69	0,99	1781	0,66	1,07	1687
0,200	0,66	0,78	1645	0,69	0,87	1736	0,69	0,98	1736	0,69	1,11	1736
0,205	0,69	0,77	1694	0,69	0,86	1694	0,69	0,97	1694	0,69	1,10	1694
0,210	0,69	0,77	1653	0,74	0,90	1751	0,69	0,96	1653	0,69	1,08	1653
0,215	0,74	0,81	1710	0,74	0,90	1710	0,74	1,00	1710	0,74	1,13	1710
0,220	0,74	0,81	1671	0,78	0,95	1776	0,74	0,99	1671	0,74	1,11	1671
0,225	0,78	0,85	1736	0,78	0,94	1736	0,74	0,98	1634	0,78	1,17	1736

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 25. August 2014

Matthias Wagner